



**Universidade de
Aveiro
2017**

Departamento de Engenharia Civil

**Carlos Emanuel Reis de
Sousa e Castro
Fernandes**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE OBRAS LONGITUDINAIS
ADERENTES E QUEBRAMARES DESTACADOS**



**Universidade de
Aveiro
2017**

Departamento de Engenharia Civil

**Carlos Emanuel Reis de Sousa e Castro
Fernandes**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE OBRAS LONGITUDINAIS
ADERENTES E QUEBRAMARES DESTACADOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

“A persistência é o menor caminho para o êxito”

Charles Chaplin

o júri

presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professor Auxiliar de Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho
Investigador Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor Auxiliar de Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço,

Aos meus pais pelo apoio incondicional, presença assídua naquilo que foi o meu percurso académico, que sempre me creditaram o trabalho e o esforço, mantendo sempre uma atitude positiva que nos momentos mais difíceis é necessária. Aos meus avós, pela preocupação demonstrada em todo o meu percurso, sempre com um sorriso e torcendo pelo meu triunfo em todas as minhas atividades. Para além disso, obrigado por todas as velas acesas em meu favor, com carinho e preocupação.

Ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, por toda a ajuda sempre demonstrada no percurso que tivemos juntos, pela orientação académica que foi tão necessária para a obtenção de resultados, e por todas as horas em debate de ideias, um obrigado.

À Márcia Lima pela disponibilidade sempre demonstrada no apoio à modelação numérica.

À minha namorada, Maria Brito, por tudo aquilo que representou neste caminho, aquele apoio direto e como tanto se fez sentir deste lado, e que independentemente da situação sempre conseguiu transmitir positivismo, confiança e o maior sorriso. |||||

A todos aqueles que fizeram este caminho comigo, ou pelo menos, fizeram parte dele. A todos aqueles com quem desenvolvi laços nos tempos extracurriculares, equipa do Núcleo de Estudantes de Engenharia Civil e Lista à Associação de Académica de Estudantes. A todos os meus companheiros do DeC e das equipas em que estive. Aos génios da redondinha e ao GT. E diretamente ao Hélder, Luciano, Rafael, Pica, Freitas, zero, Joni, Filipe, João, Nuno, Rui Pedro, Tiagão, Tinago, Diego, Madureira, Joel, Costa, Teixeira, Janeiro, Luísa, Padrão, Rui, Amorim, Rafinha, Barcelos e Iscas.

palavras-chave

Espraçamento, galgamento, perfil transversal, posição da linha de costa, modelação numérica.

resumo

Os problemas de erosão costeira ao longo do litoral português têm aumentado a exposição das obras longitudinais aderentes à ação direta da agitação marítima, sendo cada vez mais comum os relatos de galgamentos e inundações costeiras. Em alternativa a estas obras, são referidos com frequência os quebra-mares destacados, capazes de dissipar a energia da onda em zonas mais afastadas da linha de costa. Os impactos destas obras e os custos que lhes estão associados são de difícil avaliação, gerando discussão na comunidade técnica e científica.

Neste trabalho procede-se à avaliação do grau de dissipação da energia da agitação marítima, através do espraçamento das ondas no talude das obras longitudinais aderentes, ou do coeficiente de transmissão nos quebra-mares destacados. Desta forma, compara-se a eficácia de diferentes soluções na redução da frequência de galgamentos. Procede-se também à avaliação do impacto destas estruturas na evolução da linha de costa, com recurso ao modelo numérico de evolução da linha de costa GENESIS.

Verifica-se que a dimensão das obras necessária para que as estruturas limitem a ocorrência de galgamentos depende do clima de agitação incidente, pelo que a melhor solução para um determinado cenário, pode não representar a melhor solução para outro cenário de agitação incidente. Da mesma maneira, a dimensão e localização das obras condiciona a evolução da linha de costa na vizinhança da estrutura, com impacto na adoção da solução que mais mitiga a erosão.

keywords

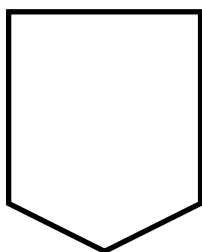
Swash, overtopping, transversal profile, coastline, numerical model.

abstract

The problems of coastal erosion along the Portuguese coast have increased the exposure of the revetment to the direct action of the sea agitation, being more and more common reports of overtopping and coastal floods. As an alternative to these solution, the detached breakwaters are often referred to capable of dissipating wave energy in offshore areas. The impacts of these structures and the associated costs are difficult to evaluate, generating discussion in the technical and scientific community.

In this work, the degree of dissipation of the energy of the sea agitation is evaluated, by means of the swash in the slope of the revetment, or of the coefficient of transmission in the offshore breakwaters. In this way, the effectiveness of different solutions in the reduction of the frequency of overtopping is compared. It is also evaluated the impact of these structures on the evolution of the coastline, using the numerical model GENESIS.

It is understood that the size of the structures necessary for the structures to limit the occurrence of overtopping depends on the incident agitation climate, so the best solution for one scenario may not be the best solution for another incident agitation scenario. In the same way, the size and location of the structures conditions the evolution of the coastline in the near zone of the structure, with impact on the adoption of the solution that most mitigates erosion.



ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	METODOLOGIA	5
2	OBRAS DE DEFESA COSTEIRA	
2.1	OBRAS LONGITUDINAIS ADERENTES	9
2.1.1	GENERALIDADES	9
2.1.2	PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO	12
2.1.3	IMPACTOS E CONSIDERAÇÕES	13
2.2	QUEBRAMARES DESTACADOS	14
2.2.1	GENERALIDADES	14
2.2.2	PERFIS BASE	16
2.2.3	PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO	19
2.2.4	IMPACTOS E CONSIDERAÇÕES	20
3	COMPORTAMENTO TRANSVERSAL: ESPRAIAMENTO	
3.1	PRAIA NATURAL	28
3.1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
3.1.2	CÁLCULO DO ESPRAIAMENTO	29
3.2	OBRA LONGITUDINAL ADERENTE	33
3.2.1	CÁLCULO DO ESPRAIAMENTO	36
3.2.2	AUMENTO DA COTA DE COROAMENTO	40
3.2.3	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	42
3.3	QUEBRAMAR DESTACADO SUBMERSO	44
3.3.1	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR VAN DER MEER & DAEMEN	47
3.3.2	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR JEFFREYS	49
3.3.3	COEFICIENTE POR ALLSOP ADAPTADO POR TAVEIRA-PINTO	50
3.3.4	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR GODA <i>ET AL.</i>	53

3.3.5	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR D'ANGREMOND <i>ET AL.</i> ADAPTADO POR VAN DER MEER <i>ET AL.</i>	54
3.3.6	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR BUCCINO & CALABRESE	57
3.3.7	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO POR AHRENS	60
3.3.8	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELOS DIFERENTES AUTORES	63
3.3.9	CÁLCULO DO ESPRAIAMENTO	65
3.3.10	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	67
3.4	COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES	68
4	<u>ANÁLISE EM PLANTA: IMPACTO NA LINHA DE COSTA</u>	
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	77
4.2	OBRA LONGITUDINAL ADERENTE	81
4.2.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	82
4.2.2	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	83
4.3	QUEBRAMAR DESTACADO SUBMERSO	85
4.3.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	86
4.3.2	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	91
4.4	CENÁRIOS ADICIONAIS	94
4.4.1	QUEBRAMAR DESTACADO SUBMERSO E OBRA LONGITUDINAL ADERENTE	94
4.4.2	DOIS QUEBRAMARES DESTACADOS SUBMERSOS	96
4.4.3	CENÁRIO COM CONDIÇÕES FRONTEIRAS ESTÁVEIS	98
4.4.4	COEFICIENTES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR	99
4.4.5	HORIZONTE TEMPORAL DA SIMULAÇÃO: 10 ANOS	101
4.5	COMPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES	102
5	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	
5.1	SÍNTESE DE RESULTADOS	109
5.2	CONCLUSÕES	117
5.3	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	120
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 - Alterações morfológicas e danos causados nas zonas costeiras	2
Figura 1.2 - Zonas de intervenção costeira (esporões a verde e obras longitudinais aderentes a laranja) no distrito de Aveiro, adaptado de (Valente, 2015)	3

Capítulo 2

Figura 2.1 - Exemplos de obras longitudinais aderentes com diferentes tipos de revestimento	10
Figura 2.2 - Compilação das diferentes soluções existentes para obras longitudinais aderentes, adaptado de (David, 2006)	11
Figura 2.3 - Diferentes formas de utilização de quebramares destacados	15
Figura 2.4 - Tipos de quebramares e respetivos perfis transversais	17
Figura 2.5 - Funcionamento e soluções de quebramares submersos	19
Figura 2.6 - Efeito secundário da utilização de um conjunto de quebramares destacados	22

Capítulo 3

Figura 3.1 - Fenómeno de espraçamento e refluxo (Pereira, 2008)	27
Figura 3.2 - Perfil de praia adotado	29
Figura 3.3 - Espraçamento máximo em função de $H_s(m)$ e $T(s)$	33
Figura 3.4 - Perfil tipo de obra longitudinal aderente	34
Figura 3.5 - Perfis transversais utilizados na caracterização de obras longitudinais aderentes, com as respetivas dimensões e áreas transversais, por inclinação	35
Figura 3.6 - Recuo da linha de costa com a implantação da obra longitudinal aderente em linha de costa com areal	36
Figura 3.7 – Espraçamento máximo em função da altura de onda e do período	39
Figura 3.8 – Perfil da solução com aumento da cota de coroamento de fora a colmatar os galgamentos ($2/3 (V/H)$)	41
Figura 3.9 – Relação da área transversal mínima para mitigar galgamentos com a altura de onda, por inclinação	42
Figura 3.10 - Desempenho das obras longitudinais aderentes em função da inclinação do talude	43

Figura 3.11 - Perfil tipo de quebramar destacado submerso	45
Figura 3.12 - Variação do K_t em função de H_i onde se fixaram: $d=7m$, $T=12s$ e $D_{n50}=1.15m$	48
Figura 3.13 - Análise de sensibilidade com variáveis fixas: $B= 5m$, $d= 7m$ e $H_s= 6m$	49
Figura 3.14 - Linhas de tendência que relacionam o R^* com o K_t (Taveira-Pinto, 2001)	51
Figura 3.15 - Análise de sensibilidade das variáveis do calculo do K_t	52
Figura 3.16 - Análise de sensibilidade das variáveis para calculo do K_t	54
Figura 3.17 - Relação entre o K_t com o aumento da profundidade do R_c por inclinação para as sucessivas alturas de onda (m)	56
Figura 3.18 - Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$, $T=10s$, $H_s=4m$)	57
Figura 3.19 - Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$)	59
Figura 3.20 - Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$)	62
Figura 3.21 - Comparação dos valores obtidos do K_t pelos diferentes autores por H_s (m) ($T=10s$, $B=5m$, $V/H=2/3$, $d=410m$)	64
Figura 3.22 - Espraçamento sobre a praia natural após passagem sobre o quebramar destacado com diferentes R_c em função de H_s	66
Figura 3.23 - Quebramares submersos com diferentes cotas de coroamento	68
Figura 3.24 - Relação entre a altura galgada e a área transversal da estrutura	69
Figura 3.25 - Relação entre a altura de espraçamento galgada e a área transversal para as obras longitudinais aderentes (linha) e os quebramares destacados (tracejado), por altura de onda	70
Figura 3.26 - Área transversal mínima para mitigar os galgamentos	73

Capítulo 4

Figura 4.1 - Casos de modelação longitudinal analisados	78
Figura 4.2 - Resultados da simulação do cenário de referência	79
Figura 4.3 - Identificação das considerações adotadas na análise da variação da posição linha de costa	81
Figura 4.4 - Resposta da linha de costa à presença de uma obra longitudinal aderente	81

Figura 4.5 - Comportamento da linha de costa a 5 anos na presença da obra longitudinal aderente para diferentes eixos e comprimentos de obra	82
Figura 4.6 - Comportamento da linha de costa na presença de uma obra longitudinal aderente	84
Figura 4.7 - Nomenclatura associada ao comportamento em planta da linha de costa na presença de quebramares destacados (adaptado de David, 2006)	85
Figura 4.8 - Posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação, variando as características físicas da estrutura, respetivamente L (a, b, c), d (d, e, f) e K_t (g, h, i)	87
Figura 4.9 - Comportamento longitudinal das linhas de costa que completaram o tómbolo antes de 5 anos	89
Figura 4.10 - Evolução da área de tómbolo formado completo por tempo de formação em cada caso ocorrido	90
Figura 4.11 - Y_g de diferentes cenários para os 3 coeficientes de transmissão analisados	91
Figura 4.12 - Erosão relativa por cenário modelado em relação ao cenário de referência	92
Figura 4.13 - Variação total das áreas da linha de costa dos cenários modelados por K_t	93
Figura 4.14 - Posição da linha de costa nos cenários que conjugam um quebramar destacado ($d=410m$ e $K_t=0.48$) e uma obra longitudinal aderente de comprimento L igual	95
Figura 4.15 - Posição mais recuada da linha de costa (Y_g) para o cenário <i>L.3.1</i> (linha continua) e para a solução mista (linha a tracejado), para os diferentes comprimentos de estrutura	96
Figura 4.16 - Resposta da linha de costa (áreas) na presença das obras de defesa por volume de obra	97
Figura 4.17 - Posição da linha de costa no cenário <i>2.3.1</i> e para o cenário com 2 quebramares destacados	97
Figura 4.18 - Áreas e erosão (A_1 e A_2) e acreção (A_3) por volume total de obra	97
Figura 4.19 - Posição da linha de costa para o cenário <i>2.3.1</i> com fronteiras fixas	99
Figura 4.20 - Posição da linha de costa para diferentes coeficientes de transporte sedimentar	99
Figura 4.21 - Resultados obtidos da modelação com diferentes coeficientes de transporte sedimentar	100
Figura 4.22 - Evolução da linha de costa ao longo do tempo para o cenário <i>2.3.1</i>	101

Figura 4.23 - Avanço e recuo máximo registado em cada ano de modelação	101
Figura 4.24 - Balanço da perda/ganho anual a 10 anos em comparação com cenário de praia sem obras	102
Figura 4.25 - Relação entre as áreas de erosão e o volume das estruturas de defesa costeira utilizadas	103
Figura 4.26 - Relação entre as áreas de alteradas da linha de costa a 5 anos e o volume das estruturas de defesa costeira utilizadas	104

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Tipos de onda dependente do valor de Iribarren	30
Tabela 3.2 - Espraçamento para a praia natural com uma inclinação de 8%	32
Tabela 3.3 - Valores obtidos para cálculo do espraçamento e do galgamento	37
Tabela 3.4 - Valores de coeficiente de transmissão para um $B=5\text{m}$, $D_{n50}=1.019\text{m}$, $H_s=4\text{m}$ e $T=8\text{s}$	48
Tabela 3.5 - Valores para o cálculo do K_t por Jeffreys	50
Tabela 3.6 - Valores de R^* e K_t com a alteração do R_c ($H_s=4\text{m}$, $T=10\text{s}$ e $d=410\text{m}$)	52
Tabela 3.7 - Parâmetros de transmissão segundo Goda <i>et al.</i> (1967)	53
Tabela 3.8 - Valores para o cálculo do K_t por Goda <i>et al.</i> (1967) ($V/H=2/3$, $v = 0.15$, $\alpha=2.6$ e $H_s=4\text{m}$)	54
Tabela 3.9 - Valores para cálculo do K_t por Van der Meer <i>et al.</i> (2005) ($V/H=2/3$, $B=5\text{m}$, $H_s=4\text{m}$ e $K_{tu}=0.92$)	55
Tabela 3.10 - Valores para o cálculo do K_t por Buccino e Calabrese ($V/H=1/3$, $H_s=4\text{m}$ e $B=5\text{m}$)	58
Tabela 3.11 - Valores para o cálculo do K_t por Ahrens ($D_{n50}=1.019$, $H_s=4\text{m}$, $D=7\text{m}$, $B=5\text{m}$)	61
Tabela 3.12 - Espraçamento na praia associado à onda transmitida pelo ao quebramar destacado, para $H_s=4\text{m}$	65
Tabela 3.13 - Área transversal de estrutura para mitigar galgamentos, considerando o cenário de $T=10\text{s}$	71
Tabela 3.14 - Comparação direta das duas soluções entre parâmetros equivalentes	74

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros físicos dos quebramares destacados de análise e as dependências provenientes da análise transversal	80
Tabela 4.2 - Áreas de erosão e acreção na presença da uma obra longitudinal aderente com diferentes eixos de inserção e comprimentos de obra	83
Tabela 4.3 - Nomenclatura para as combinações modeladas dos quebramares	86

Tabela 4.4 - Áreas de erosão e acreção na presença de um quebramar com comprimento de 100m 88

Tabela 4.5 - Áreas de erosão e acreção na presença de um quebramar com comprimento de 200m 88

Tabela 4.6 - Áreas de erosão e acreção na presença de um quebramar com comprimento de 400m 88

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

GENESIS	<i>Generalized Model for Simulating Shoreline Change</i>
NMM	Nível Médio da superfície livre do Mar
OLA	Obra Longitudinal Aderente
QB	Quebramar destacado

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas maiúsculas

A	Parâmetro do diâmetro dos sedimentos	[-]
A_t	Área transversal	[m ²]
A_1	Área em erosão na zona 1	[m ²]
A_2	Área em erosão na zona 2	[m ²]
A_3	Área em acreção na zona 3	[m ²]
B	Largura de coroamento	[m]
B_{inf}	Base inferior do perfil	[m]
D_{n50}	Diâmetro nominal dos blocos	[m]
H	Altura de onda	[m]
H_t	Altura de onda transmitida pelo quebramar destacado	[m]
H_s	Altura de onda significativa	[m]
K_t	Coefficiente de transmissão	[-]
K_{tu}	Limite superior para o K_t	[-]
L	Comprimento da estrutura	[m]
L_g	Distância entre quebramares destacados	[m]
L_{op}	Comprimento de onda em águas profundas determinado com o T_{op}	[m]
L_s	Comprimento de onda	[m]
M_{50}	Massa média do manto resistente	[kg]
R_c	Profundidade de coroamento em relação ao NMM	[m]
$R_{máx}$	Espraçamento máximo	[m]
R^*	Coefficiente adimensional de transmissibilidade	[-]
S_{op}	Declividade da onda em águas profundas determinado com o L_{op}	[-]

T	Período de onda	[s]
T_m	Período de onda médio	[s]
T_{op}	Período de onda de pico	[s]
T_s	Período de onda significativo	[s]
V/H	Inclinação do talude da estrutura (vertical/horizontal)	[v/h]
Y_g	Distância de maior erosão	[m]
Y_s	Distância de maior acreção	[m]

Letras latinas minúsculas

d	Afastamento do eixo da estrutura à linha de costa	[m]
g	Aceleração da gravidade	[m ² /s]
h_c	Altura da estrutura	[m]
h	Profundidade no perfil de Dean	[m]
p	Profundidade da batimetria	[m]
y	Distância de afastamento à linha de costa em perfil	[m]

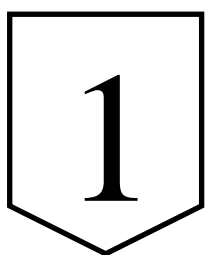
Letras gregas maiúsculas

ΔH	Altura galgada em cada estrutura	[m]
ΣA	Somatório entre áreas de erosão (negativas) e acreção (positivas)	[m ²]

Letras gregas minúsculas

α, ν	Coefficientes empírico para o cálculo do K_t	[-]
β	Inclinação da zona emersa do perfil de praia	[°]
ζ	Número de <i>Iribarren</i>	[-]

ξ_{op}	Número de <i>Iribarren</i> determinado com s_{op}	[-]
π	Constante adimensional	[-]



INTRODUÇÃO

Cada vez mais as zonas do litoral enfrentam problemas de erosão costeira, problemas estes que associados ao recuo da linha de costa e à falta de fluxo sedimentar podem causar avultados prejuízos. Face aos problemas de erosão que algumas zonas do litoral enfrentam, tem-se tornado cada vez mais urgente a adoção de uma política preventiva, de modo a evitar a exposição dos aglomerados urbanos que se encontram em risco de sofrer as várias ações diretas do mar. Torna-se então essencial aprofundar o estudo das estratégias de proteção e defesa costeira e realizar um balanço económico das diferentes opções (Lima, 2011; Martinho, 2013). Geralmente, com a construção das obras de defesa costeira, as zonas intervencionadas são protegidas, mas estas obras afetam indiretamente outros locais onde é antecipada ou agravada a situação de erosão, conduzindo à necessidade de novas medidas de proteção nessas zonas, estendendo as zonas de intervenção sujeitas a proteção costeira.

1.1 Enquadramento

A costa portuguesa, sobretudo a de noroeste, apresenta elevada fragilidade geomorfológica e exposição aos processos erosivos, associados ao clima de agitação marítima, altamente energético, à diminuição do transporte sedimentar e à pressão antrópica (Romão *et al.*, 2015). Por existirem estes locais expostos a um clima de agitação marítima energética, que são muito propensos a alterações morfológicas, o litoral português está dependente das alterações das ações hidromorfológicas do meio envolvente.

Constatou-se com o tempo que era necessário realizar construções que contivessem e/ou dissipassem a energia proveniente dos oceanos e diminuíssem o problema da erosão, mas com estas intervenções levantaram-se outro tipo de problemas. As escolhas tomadas devem ser medidas com redobrada atenção dado o tipo de consequências provenientes da escolha implementada. As ações antropogénicas de carácter mais rígido, para além do seu efeito benéfico pelo qual são construídas, constituem em paralelo um problema no sistema costeiro que, após a sua construção, ficam menos equilibrados. Este desequilíbrio varia consoante o tipo de intervenção, pois algumas destas obras têm consequências associadas como, por exemplo, o recuo da linha de costa, o assoreamento perto destas ou a redução do caudal sólido afluente ao litoral, enfraquecendo a alimentação sedimentar das praias. Como os litorais são zonas de interface entre a geosfera, a hidrosfera, a atmosfera e a biosfera, sendo sistemas altamente complexos que resultam num equilíbrio dinâmico, qualquer alteração

num dos elementos constitutivos que geram este equilíbrio pode provocar a rutura de todo o conjunto (Freitas, 2010).

O aumento da concentração populacional nas zonas costeiras leva a um proporcional acréscimo de edificações junto à linha de costa (Figura 1.1a). Este fator associado à subida do nível do mar, ao défice sedimentar e à destruição de linhas de defesa naturais conduzem a um crescimento das taxas de erosão, originando recuos da posição da linha costeira (Figura 1.1b), colocando em perigo populações, edificações e outros bens localizados na orla costeira (Narra *et al.*, 2015), como é constatável na Figura 1.1.



Figura 1.1 - Alterações morfológicas e danos causados nas zonas costeiras

A decisão de construir uma estrutura costeira deve basear-se numa análise aprofundada da evolução da linha costeira até então, e da evolução prevista para o futuro. Os processos

físicos envolvidos nos fenómenos que causam a erosão devem ser devidamente identificados, caso contrário podem ser tomadas decisões erradas. A defesa destas zonas urbanas perto da linha de costa é dificultada devido à excessiva proximidade ao areal. As soluções implementáveis são assim afetadas, provocando erosões a sotamar da estrutura. Muitas vezes a erosão é resolvida estendendo a estrutura ao longo do lado erodido. São estes pormenores que devem ser realçados e designados como relevantes para não existir um plano crescente de erosão pós construção (Rijn, 2013). Na Figura 1.2 ilustra-se o caso da costa portuguesa na zona do distrito de Aveiro, onde foi necessária a construção de 10 obras longitudinais aderentes para proteção das zonas urbanas numa vasta extensão de areal, devido a diferentes problemas de galgamentos e erosão, ao longo do tempo (Valente, 2015).

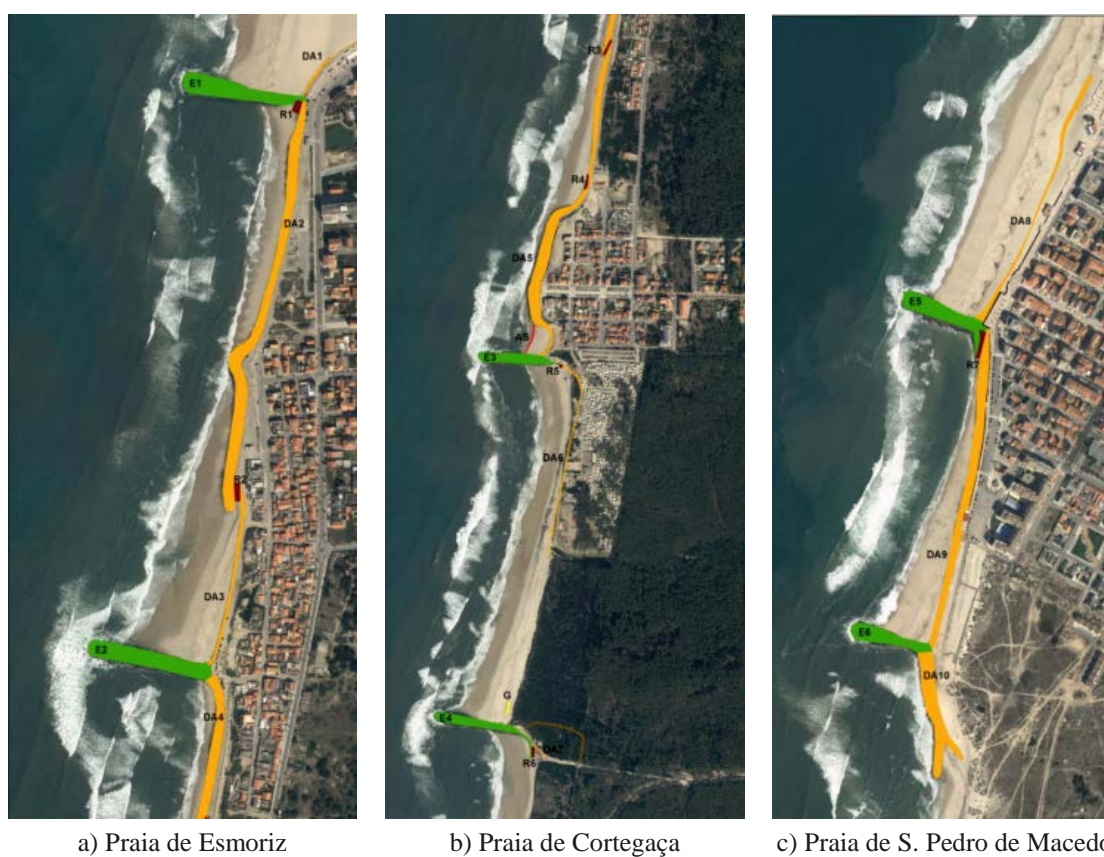


Figura 1.2 – Zonas de intervenção costeira (esporões a verde e obras longitudinais aderentes a laranja) no distrito de Aveiro, adaptado de (Valente, 2015)

Perante este cenário, as alternativas de intervenção de defesa costeira assumem tanto vantagens como desvantagens. Se há um desejo real de se afastar de uma abordagem simples de engenharia rígida na costa, então existe um grande desafio para os que se dedicam aos

estudos costeiros. A educação costeira tem um papel central nesse sentido, assumindo por base a comunicação mais ampla dos resultados dos estudos científicos e um maior conhecimento das incertezas envolvidas (Woodroffe, 2002).

Existe um leque de soluções possíveis para a defesa da orla costeira, sendo que uma das mais frequentes é a construção de obras longitudinais aderentes. Estas, para além de terem como função principal prevenir/atenuarem galgamentos e inundações, fixam a linha de costa com o alinhamento pretendido. As obras longitudinais aderentes têm representado soluções eficazes quanto ao recuo da linha de costa e à sua proteção, mas revelam um custo avultado tanto na construção/reabilitação, como na manutenção. No entanto, existem outras alternativas de intervenção na orla costeira a médio/longo prazo para combate à erosão costeira, como por exemplo os quebramares destacados.

Desta forma, é importante aprofundar o estudo de cada solução, para que seja possível optar pela melhor solução, conhecendo os tipos de consequências (intervensões, custos associados, desempenho em perfil e em planta, etc.) que lhe estão subjacentes, para que seja possível intervir nos problemas de erosão costeira de forma eficaz.

1.2 Objetivos

Os problemas de erosão costeira ao longo do litoral português têm aumentado a exposição das obras longitudinais aderentes à ação direta da agitação marítima, sendo cada vez mais comum os relatos de galgamentos e inundações costeiras. Em alternativa a estas obras, são referidos com frequência os quebramares destacados, capazes de dissipar a energia da onda em zonas mais afastadas da linha de costa. Os impactos destas obras e os custos que lhes estão associados são de difícil avaliação, gerando discussão na comunidade técnica e científica. O principal objetivo da presente dissertação é realizar o estudo associado às soluções mencionadas, avaliando o comportamento das estruturas e a sua resposta, tanto no sentido de dissipação de energia à ação direta das ondas, como no capítulo do impacto da erosão costeira e desenvolvimento da linha de costa na vizinhança da obra.

No final do estudo espera-se a identificação e avaliação dos impactes positivos e negativos de cada solução abordada (obras longitudinais aderentes e quebramares destacados),

permitindo estimar os possíveis galgamentos em função da variação das dimensões geométricas que cada solução pode assumir, relacionada com a área transversal necessária associada a cada hipótese analisada. Pretende-se também estimar quais as melhores dimensões para cada estrutura, tendo como parâmetro diferenciador o desempenho, as consequências associadas à construção das mesmas a médio e longo prazo (erosões agravadas a sotamar com o recuo da linha de costa) e os volumes de material necessário. Espera-se no final do estudo ser possível responder à questão: qual a solução mais rentável a nível transversal e em planta, entre as estruturas visadas?

Esta dissertação tem também o objetivo de auxiliar a tomada de decisão de projetistas e entidades que façam a gestão da costa portuguesa, em futuras intervenções que sejam realizadas no litoral, onde seja necessário implementar uma solução de defesa costeira.

1.3 Metodologia

Na perspetiva de dar resposta aos objetivos apresentados, inicia-se o trabalho com uma introdução geral sobre o enquadramento do problema da erosão costeira, que leva à construção de obras de defesa. No segundo capítulo focam-se as estruturas analisadas para fazer face à erosão, mais concretamente as obras longitudinais aderentes e quebramares destacados. Referem-se os parâmetros de caracterização teórica que estão subjacentes ao tema da dissertação, características relevantes, o comportamento espectável e os impactos das estruturas. Com este capítulo serão criadas bases teóricas para o bom entendimento da discussão que a dissertação visa focar.

Os dois capítulos seguintes destinam-se ao estudo da avaliação do comportamento das obras na agitação e na evolução da linha de costa. Sendo assim, no terceiro capítulo, é realizada uma abordagem aos galgamentos espectáveis que ocorrem nas obras longitudinais aderentes e quebramares destacados submersos. Faz-se uma estimativa sobre a eventualidade de ocorrência de galgamentos com as diferentes configurações de agitação incidente. Modificando fatores como a inclinação do perfil, a cota de coroamento, a altura de onda e o período de onda serão avaliados os valores de espraio esperados. No âmbito do estudo dos quebramares destacados, avaliar-se-á o coeficiente de dissipação de agitação marítima

que a estrutura induz. Elaboram-se também correlações com a área transversal utilizada em cada estrutura, de forma a perceber e rentabilidade das mesmas.

O quarto capítulo refere-se à evolução da linha de costa mediante a construção de estruturas de defesa costeira como as obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados. Avalia-se o comportamento das estruturas em função da sua localização e do seu comprimento. Nos quebramares elaboram-se tipos de combinações das características físicas que provocam diferentes respostas. Partindo desse princípio, diferentes cenários foram modelados através do programa GENESIS (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) (Hanson e Kraus, 1989). Com este modelo numérico é possível criar um ambiente de simulação realista de sistemas de transporte de sedimentos, sistemas estes que sofrem alterações com a construção das obras longitudinais aderentes ou quebramares destacados. O modelo permite ter uma noção da alteração da sucessiva posição da linha de costa na implementação deste tipo de obras, avaliando desta forma o comportamento do perfil de praia para cada solução estudada.

Por último, o capítulo 5 sintetiza as principais considerações, relembra os principais resultados e propõe alguns desenvolvimentos que podem vir a ser realizados no futuro para continuidade e melhoria do trabalho até aqui desenvolvido.



OBRAS de DEFESA COSTEIRA

Taveira-Pinto (2001) classifica as intervenções de defesa costeira como obras transversais, longitudinais e de alimentação artificial e transposição de sedimentos, existindo também soluções mistas, conjugando em simultâneo mais que um tipo de intervenção. Nesta classificação os esporões inserem-se nas estruturas transversais mais utilizadas, com uma estrutura impermeável ou permeável no sentido longitudinal da costa, podendo ser utilizados individualmente ou em conjunto com outros esporões, formando aquilo que se designa por campo de esporões. Já as estruturas classificadas como longitudinais são todas aquelas intervenções que se encontram sensivelmente paralelas à linha de costa, podendo estas ser aderentes ou destacadas da costa. Assim como as estruturas transversais, os sistemas de defesa longitudinais destacados podem ser utilizados individualmente ou em conjunto, formando um campo de estruturas longitudinais destacadas. Estas têm associados elevados custos de reabilitação que são muitas vezes menosprezados e minorados aquando da sua construção e que, devido à falta de monitorização e aos níveis de eficácia variáveis no tempo, têm conduzido a situações frequentes de ocorrência de danos não só na própria estrutura, mas também nas zonas marginais (Cruz *et al.*, 2015).

A alimentação artificial baseia-se na alimentação da linha de costa com volumes de sedimentos, como forma de defesa do litoral. A junção de diferentes processos de defesa também é uma solução possível, onde se conjuga a utilização de estruturas transversais e/ou longitudinais, individualmente ou em conjunto, com alimentação artificial de sedimentos. A dissertação desenvolve maior foco nas soluções paralelas à linha de costa, mais especificamente as obras longitudinais aderentes e quebramares destacados, correspondendo a intervenções de defesa costeira com configuração longitudinal.

2.1 Obras Longitudinais Aderentes

2.1.1 Generalidades

De acordo com Taveira-Pinto (2001), as obras longitudinais aderentes normalmente são implementadas em situações de emergência em zonas seriamente atacadas pelo mar, tendo como função primordial a retenção do talude que protege e a resistência à ação direta da agitação. Estas estruturas também são utilizadas como forma de retenção de solos, implementadas para delimitar arruamentos e/ou aterros marginais. O material que se revela

mais adequado para a composição da estrutura deve ser a pedra, asfalto, bloco de betão ou outros (geossintéticos) e são geralmente colocadas em encostas, dunas ou ao longo da face de uma praia (Figura 2.1).



a) Revestimento em rocha



b) Revestimento em blocos de betão

Figura 2.1 - Exemplos de obras longitudinais aderentes com diferentes tipos de revestimento

As obras longitudinais aderentes, também classificadas como revestimentos, constituem uma capa resistente que faz frente à erosão, onde é possível revestir diretamente sobre o declive existente com material que proteja a costa do impacto da agitação. A sua estrutura assenta em três características principais, com uma camada de armadura estável (manto resistente), uma camada de filtro ou *underlayer* e o pé de talude (fundação) que ofereça estabilidade à estrutura. A entrada de água dentro da estrutura da obra é intencional, já que desta forma se consegue aumentar a rugosidade, aumentando diretamente a resistência ao espraçamento (David, 2006). No projeto da obra pode-se ainda optar por colocar duas ou mais camadas de blocos, onde os blocos das camadas superiores são maiores, proporcionando uma maior estabilidade contra ataques de agitação marítima em zonas mais agitadas (Dean e Dalrymple, 2001). A proteção da fundação impede o deslizamento e fornece suporte para todos os materiais das camadas que acima se estabelecem. Este tipo de estrutura torna-se significativamente onerosa em zonas costeiras com elevados níveis energéticos da agitação, atendendo à sua elevada exposição, custos de construção, e aos elevados volumes de material utilizados.

O correto funcionamento destas estruturas depende de vários parâmetros funcionais, de que se salientam: batimetria local, clima de agitação incidente, características dos sedimentos, profundidade de implantação, comprimento da estrutura, distância entre estruturas adjacentes, cota de coroamento e concepção estrutural (Taveira-Pinto, 2001; Veloso-Gomes, 2010). Dessa forma apresentam-se as diferentes soluções que se ajustam às exigências (Figura 2.2).

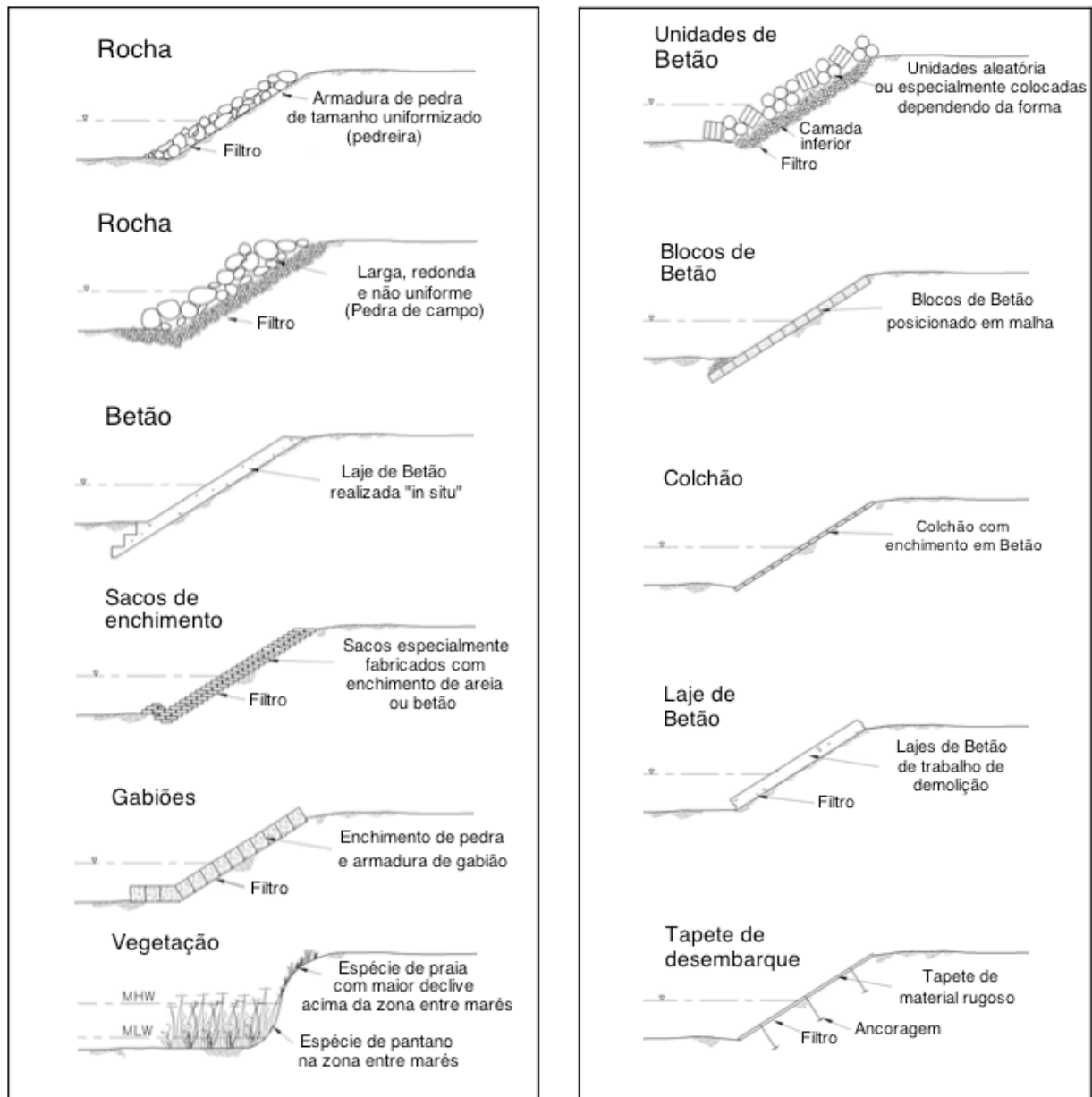


Figura 2.2 - Compilação das diferentes soluções existentes para obras longitudinais aderentes, adaptado de (David, 2006)

A Figura 2.2 contém uma compilação das soluções existentes, ilustrando que dependendo das características acima mencionadas, variam as características mais adequadas da solução, já que existe de facto uma variada escolha possível no que toca às obras longitudinais aderentes, sendo que as mais utilizadas são as opções de betão e de rocha.

2.1.2 Parâmetros de caracterização

Existem certos aspetos de conceção e execução da obra que podem condicionar a eficiência destas soluções devido a infraescavações, assentamentos e galgamentos. A não contabilização ou má previsão destes aspetos no dimensionamento poderá ter repercussões no normal funcionamento das estruturas, que em cenários de agitação mais energética poderão sofrer a destruição total ou parcial. Quando as fundações não atingem estratos rochosos e as erosões são acentuadas, os riscos de instabilidade são maiores. Assim, a profundidade da cota de fundo deve ser suficiente para evitar queda por ação da escavação e consequente escorregamento (destruição por infraescavação) e a cota de coroamento deve ser suficientemente elevada para evitar o excesso de galgamentos durante ondas altas (Dean e Dalrymple, 2001; Taveira-Pinto, 2001).

A eficácia das obras longitudinais aderentes é medida pela correta dissipação da agitação proveniente do mar. Se a altura da onda de projeto tiver uma profundidade limitada na frente da estrutura, então, com o passar do tempo é possível que esta profundidade mude, e consequentemente no mesmo período de tempo a estrutura fique mais vulnerável a galgamentos e reduza a sua eficiência (Dean e Dalrymple, 2001).

Como referido, os parâmetros que caracterizam o perfil de uma obra longitudinal aderente devem ser adequadamente dimensionados, visto que, se não forem tomadas certas medidas preventivas, este pode perder eficiência ou mesmo sofrer danos graves. As características básicas de projeto deverão ter em consideração (Rijn, 2013):

- A inclinação do revestimento, que deve ser menor do que a inclinação da duna. Um talude adequado poderá apresentar uma inclinação de $1/3$ (V/H) para se obter uma boa transição (baixa reflexão);

- O fundo do revestimento deve ultrapassar vários metros abaixo do nível da base da duna (mais de 3m) para reduzir a falha por escavação que durante tempestades mais energéticas podem acontecer;
- A cota de coroamento deve estar a vários metros acima do nível médio das águas do mar (dependendo do clima de agitação e da amplitude da maré). O revestimento deve ser suficientemente elevado para evitar grandes percentagens de galgamentos em condições normais; a onda que embate na estrutura deve ser reduzida tanto quanto possível;
- A manutenção da estrutura após eventuais danos causados por tempestades é uma necessidade.

2.1.3 Impactos e considerações

Apesar destas obras fixarem a posição da linha de costa e minimizarem o espraçamento, as soluções agora referidas apresentam algumas desvantagens. Existe uma degradação do valor (recreativo, estético, etc.) da praia, por diminuição da área útil da praia (provocada pela estrutura), por impacto visual negativo e por introdução de dificuldades de acesso à própria praia. Nas zonas costeiras em erosão, as obras longitudinais aderentes funcionam como “alinhamentos” fixos de referência e à medida que a praia vai erodindo, vai ficando mais estreita. O impacto destas estruturas na zona frontal da praia e nos troços vizinhos deverá ser avaliado efetuando simulações de evolução da posição da linha de costa, com e sem a presença das estruturas (Coelho, 2005).

Silvester (1974) menciona testes que indicam que as praias em frente às obras de defesa costeira recuarão ao ponto de serem inexistentes, devido à ação de ondas estacionárias resultantes da reflexão. Assume-se, na presente dissertação, o recuo do areal na frente da estrutura como consequência direta da existência da obra longitudinal aderente, num período temporal de médio a longo prazo. Por este motivo, as ondas incidentes percorrem cada vez menos distância horizontal devido ao aumento da inclinação da obra, já que a linha de costa tende a recuar até ao pé da estrutura, perdendo desta forma toda esta distância de espraçamento.

2.2 Quebramares Destacados

2.2.1 Generalidades

Os quebramares destacados são estruturas geralmente utilizadas como obras de proteção, guiamento de correntes, estruturas secundárias de proteção à estrutura principal e como estruturas de defesa de áreas portuárias, piscatórias ou de recreio. Geralmente são aplicados em condições de agitação média ou calma, podendo ser projetados modelos emersos ou submersos, paralelos ou enviesados em relação à linha de costa (Pereira, 2008). Relativamente ao contexto hidráulico, o quebramar atua provocando a rebentação da onda incidente, a qual começa por originar, a sotamar deste, a formação de uma zona de forte turbulência, onde posteriormente, se segue a reformulação do movimento ondulatório, com uma onda transmitida com características físicas (altura e comprimento de onda) menores que a onda incidente. A redução da altura e do comprimento de onda depois de reformulada a ondulação prossegue como se cada onda se subdividisse em duas ou mais, se ocorrer rebentação (Taveira-Pinto, 2001).

As alterações na dinâmica da agitação estão na base de avaliação das várias alternativas do projeto neste tipo de estrutura. A reflexão e difração dos campos de onda devido à presença da estrutura são fatores essenciais na determinação da eficiência do quebramar. Os processos físicos de transformação da onda nas proximidades de um quebramar destacado incluem o empolamento, a refração, a difração, a dissipação de energia devido ao atrito de fundo, a rebentação, a interação entre ondas e correntes, a reflexão em estruturas e praias, a transmissão através e por cima de estruturas permeáveis e a alteração espectral devido à interação entre ondas (Huang *et al*, 2004; Nunes, 2012).

Podem ser construídos como uma estrutura única para proteção localizada de costa, ou como uma opção múltipla com espaços entre segmentos, fazendo desta maneira uma proteção de praia em larga escala, constituída apenas por quebramares (Figura 2.3a e 2.3b, respetivamente). Estas estruturas permitem que sejam desenhadas de forma a que nem todo o transporte sedimentar de longo curso seja bloqueado pela estrutura, reduzindo a potencial erosão das praias adjacentes a sotamar (Rijn, 1998; Taveira-Pinto, 2001).



Figura 2.3 – Diferentes formas de utilização de quebramares destacados

A interação entre os quebramares destacados e as praias adjacentes permite dissipar a energia das ondas, mas também é possível manipular a sua forma, número, alinhamento e dimensões para influenciar a morfologia das praias (Taveira-Pinto, 2001). A Figura 2.3c é um exemplo desse tipo de manipulação, onde se pretendeu não só defender a marginal, como se procurou originar um tipo de ilha sedimentar para funcionar como praia, utilizando desta forma a implementação de quebramares destacados para defender a costa e ganhar um novo aspeto recreativo (Deltares, 2016).

É importante ser capaz de prever a progressiva formação de um tómbolo, já que este, se manipulado, poderá ser benéfico, mas por outro lado, pode-se tornar bastante prejudicial ao bom funcionamento dos fluxos sedimentares, funcionando como um esporão num local onde este não seria necessário. Isto pode ser conseguido através da utilização de regras empíricas,

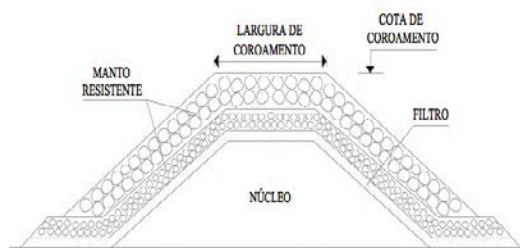
da aplicação de um modelo morfodinâmico ou de um modelo físico (Morfett, 1998).

2.2.2 Perfis base

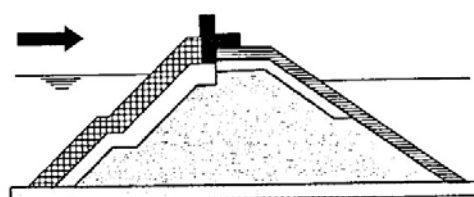
Inicialmente os quebramares eram construídos por enrocamentos lançados de modo a criar um corpo de secção transversal trapezoidal, cujos lados tinham as inclinações do talude natural dos enrocamentos lançados. Com a evolução das técnicas e face à necessidade da sua implantação em zonas progressivamente mais expostas e a maiores profundidades, surgiram blocos de betão de formas especiais, que se pretendem eficientes na dissipação da energia das ondas (Figura 2.4a e b). Estes blocos feitos de betão que possuem um comportamento mais controlado e previsível, com formatos bastante diferentes, que consigam proporcionar uma grande dissipação de energia marítima (por exemplo, dolos, tretápodos e cubo). Esta “armadura de blocos” é geralmente constituída apenas por um tipo de forma que estes blocos possam assumir (Morfett, 1998).

São geralmente fabricados unicamente em betão, o que os torna frágeis quando sujeitos a forças de tração comparativamente com forças de compressão, com exceção dos blocos multifuros, que são geralmente reforçados com aço, por apresentarem secções relativamente pequenas e mais facilmente quebráveis. Os blocos devem ser colocados de forma que, em caso de quebra de algum deles, a estabilidade não seja posta em causa e a sua substituição não seja muito complexa, sendo comum numerar os blocos para uma melhor perceção da posição no caso destes se movimentarem. Ao acontecer a fratura de um bloco, haverá uma alteração do seu centro de massa, que, por sua vez, pode levar à sua desestabilização, tornando-o mais vulnerável à ação das ondas, sendo assim fundamental assegurar a integridade dos blocos para garantir estabilidade estrutural e consequente proteção (Sousa, 2011).

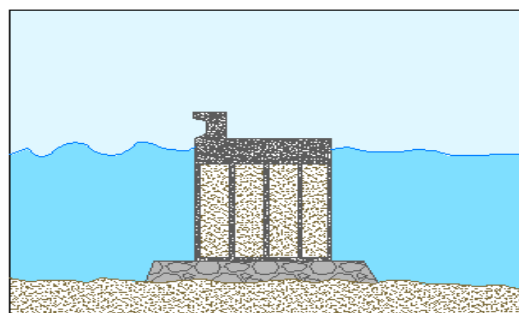
Taveira-Pinto (2001) mencionou que um novo tipo de quebramares menos convencionais começavam a ser utilizados à data. Estes, designados de quebramares de ar comprimido e quebramares flutuantes (Figura 2.4e e f), destinavam-se a casos em que por razões técnicas ou económicas as soluções mais habituais não eram exequíveis, ou para casos onde o nível de agitação marítima incidente era menor. Na Figura 2.4 apresenta-se uma compilação de tipos de quebramar existentes.



a) Quebramar de Taludes (Lima, 2011)

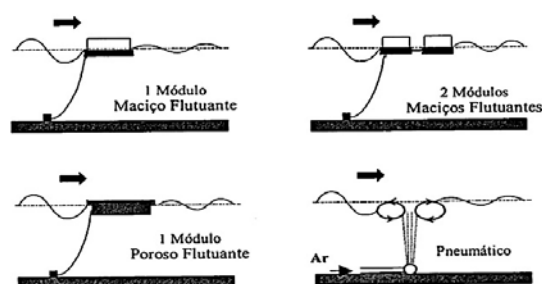


b) Quebramar de taludes com muro cortina (Taveira-Pinto, 2001)



c) Quebramar de parede vertical (Sousa, 2011)

d) Quebramar de parede vertical com muro cortina



e) Quebramar flutuante 3D

f) Tipos de quebramares flutuantes (Taveira-Pinto, 2001)

Figura 2.4 - Tipos de quebramares e respetivos perfis transversais

Os quebramares submersos (Figura 2.5a e 2.5b) também são uma solução interessante. Este tipo de estruturas tem como função permitir o amortecimento de energia através da pré-rebentação das ondas, com menores impactos visuais, embora à custa de menor eficiência na redução do espraçamento (Marinho, 2013). Devido à baixa cota de coroamento, não eliminam completamente a circulação da agitação em direção à praia. A sua eficiência depende da relação entre a altura de onda incidente e as correspondentes alturas de onda refletidas (Figura 2.5c) e transmitidas, de forma a ser atingida a proteção desejada. Esta eficiência pode variar acentuadamente com a variação das cotas dos níveis de água por efeito das marés.

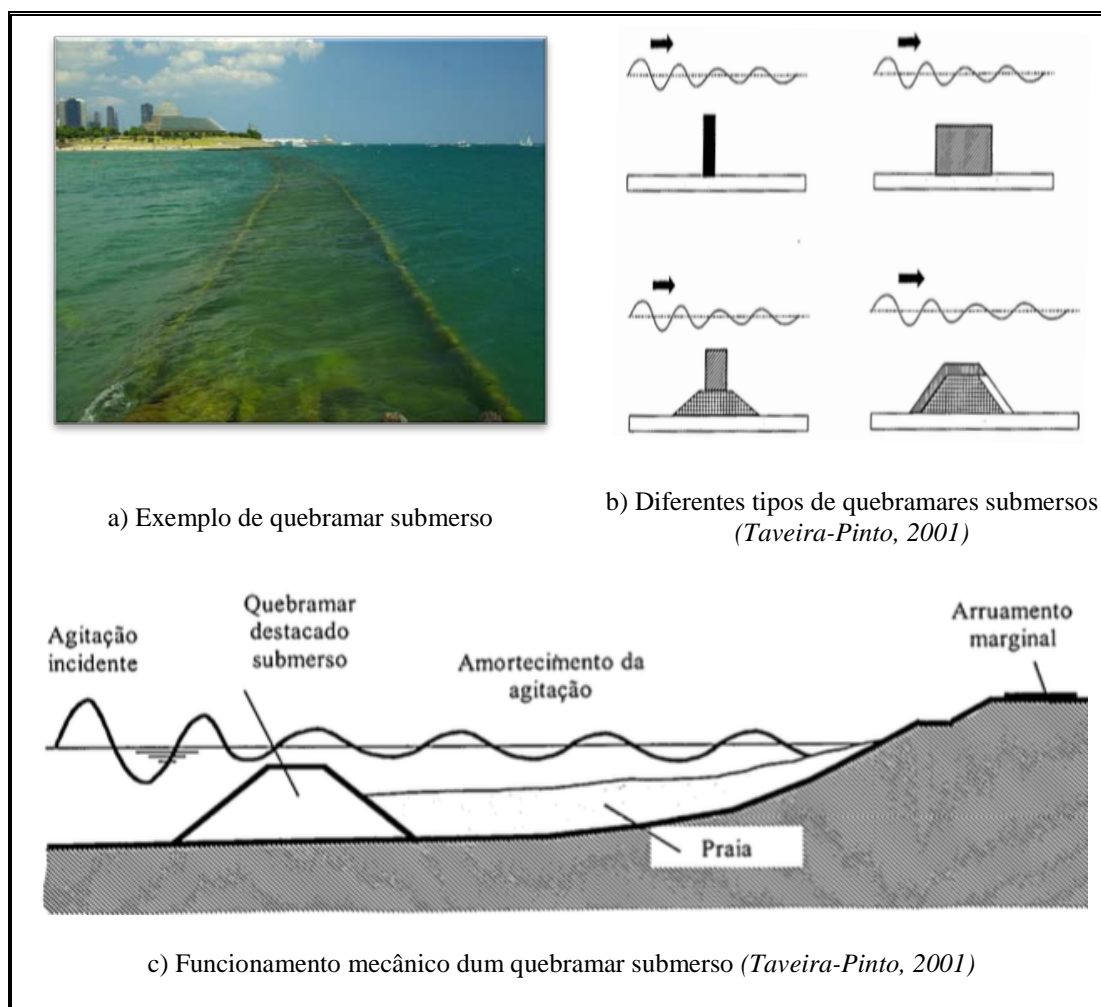


Figura 2.5 – Funcionamento e soluções de quebramares submersos

Ao serem permitidos galgamentos da estrutura, a altura do coroamento e, portanto, o volume de material necessário, podem ser significativamente reduzidos. Um quebramar deste tipo, com o nível do coroamento baixo, poderá ser provavelmente constituído por uma única camada de manto resistente, subcamadas e núcleo. Sob a ação de níveis elevados de agitação, as ondas de maior altura galgarão a estrutura, dissipando energia quando passam sobre a superfície rugosa e quando se dá o impacto sobre a massa de água existente a sotamar do quebramar. Em geral, este tipo de estrutura provoca a deposição de areias a sotamar, dando-se origem a uma nova configuração da praia por formação de um tómbolo, da qual resulta uma linha de costa estável, com um apropriado enchimento da praia, proporcionando uma área de fraca ondulação e de grande valor recreativo (Taveira-Pinto, 2001).

2.2.3 Parâmetros de caracterização

Pode haver muitas variantes na conceção de quebramares destacados, incluindo se é uma solução singular ou em conjunto segmentado, emerso ou submerso, flutuantes e de ar comprimido, etc. No caso de estudo, a solução escolhida são os quebramares submersos, que apresentam algumas vantagens relativamente a outras estruturas costeiras, devido ao facto de não terem grande impacto, quer visual, quer morfodinâmico. A sua principal vantagem é a de não provocar um efeito tão dramático no transporte longitudinal e de alterar a forma do espectro de agitação transmitido relativamente ao incidente. Em particular, e relativamente a este espectro, uniformiza as energias espectrais, atendendo a que a energia da agitação se distribui por mais frequências (Taveira-Pinto, 2001).

Este tipo de estrutura, contudo, apenas exerce função de pré-rebentação para ondas de altura superior a um dado limite (função da cota de coroamento, do comprimento da onda, largura do coroamento, etc.), ou seja, para aquelas ondas que rebentam ao passar sobre ela. Como se trata de uma estrutura submersa é menos solicitada pela agitação que a atinge, o que permite que na sua construção se empreguem blocos de menor peso (Taveira-Pinto, 2001).

Mediante a análise de Taveira-Pinto (2001), que estudou a resposta de dois quebramares destacados submersos em situação de preia-mar, é possível ter a noção que este reduz significativamente as alturas de onda características do espectro de agitação considerado no

teste, atingindo, em certos casos, uma variação de 50%, o que demonstra o poder de atenuação da energia marítima deste tipo de solução.

Para existir um bom funcionamento hidráulico dos quebramares destacados é necessário que sejam tomadas considerações, visto que, esta solução de defesa tem várias aplicações, todas elas distintas e com diferentes solicitações. A correlação entre os principais parâmetros deste tipo de estrutura não é fácil de estabelecer, pelo que em projeto se deve ter atenção (Taveira-Pinto, 2001; Rijn, 2013):

- O afastamento entre quebramares, quando existe uma solução em conjunto;
- O comprimento do quebramar conjugado à distância à linha de costa;
- A profundidade de implementação do quebramar conjugada com o respetivo comprimento;
- O tipo de estrutura e altura do coroamento;
- A deposição de areia que futuramente ocorrerá e a formação do tómbolo;
- A previsão da incidência de ondas normais e oblíquas, devido à alteração do transporte sedimentar.

Todos estes fatores se revelam importantes, já que com a alteração de cada um deles são geradas diferentes soluções, umas mais adequadas do que outras em relação ao local onde se inserem. Este tipo de estudo será mais especificado nos capítulos 4 e 5 deste documento, onde se irão avaliar fatores como a inclinação do perfil, a cota de coroamento e as características das alturas de onda.

2.2.4 Impactos e considerações

O quebramares destacados submersos são obras a ser implementadas em zonas avançadas relativamente à linha de costa, provocam diferenças hidráulicas e bio morfológicas. Na área adjacente a um quebramar destacado as condições hidrodinâmicas sofrem transformações, nomeadamente alterações das correntes que aí circulavam até à implantação da estrutura. Como são estruturas galgáveis, são originadas correntes compensatórias na área assoreada, remetendo este efeito para uma circulação da água, que contraria o impacto negativo da estagnação das águas para práticas balneares. A combinação das várias correntes locais pode ainda desenvolver, na pior das situações, remoinhos e correntes complexas que atuam junto

do talude posterior, colocando em risco os utilizadores destas zonas. Estes efeitos, nocivos à prática banhar, podem ser previstos e minimizados num dimensionamento mais cuidado. Para além da sua funcionalidade em termos de defesa e proteção costeira, deve-se ter em conta os benefícios socioeconómicos que estas estruturas podem trazer. Um quebramar destacado tem o potencial de criar ou melhorar as condições para uma larga gama de atividades recreativas na zona onde é implantado, como o uso banhar, com a prática de natação, a prática das várias variantes de surf, de pesca tradicional ou submarina e a prática de mergulho, o que pode contribuir para o aumento do desenvolvimento económico local. Devem então, estas obras rígidas de defesa costeira, ser projetadas considerando a segurança dos utilizadores das zonas circundantes (Pereira, 2008; Nunes, 2012).

Um quebramar destacado pode criar condições de assoreamento, mas também pode originar erosões na direção da corrente longitudinal, a sotamar da estrutura. Esta erosão é menos acentuada do que a criada pelos esporões, já que não reduz tanto a capacidade de transporte sedimentar longitudinal. As consequências são também de ordem biológica, todavia estas ocorrem a uma escala local, não se estendendo significativamente às zonas vizinhas. Admitindo que nenhuma estrutura costeira é capaz de anular as alterações biológicas que poderão ocorrer, a perda de espécies de zooplâncton e fitoplâncton apenas poderá ser minimizada, e nunca completamente evitada. Assim, a redução do número de quebramares destacados poderá atenuar o referido efeito pela intervenção numa área mais reduzida (Pereira, 2008). No que toca aos volumes de material inerentes a esta tipologia de proteção costeira, estes podem de facto representar custos elevados, tanto de construção, como na sua manutenção. A aplicação das estruturas também pode ser inviabilizada pela dificuldade de execução dos trabalhos de construção civil. No caso da mesma ser planeada em condições de agitação de elevada energia ou em fundos móveis, exigirá fundações muito extensas como forma de evitar as infraescavações.

A relação entre o comprimento e a distância do quebramar destacado à linha de costa, depende das características do plano de difração gerado. De facto, esta relação é bastante relevante nos quebramares destacados. Se o comprimento da estrutura for desproporcional poderá verifica-se uma difração extensa em torno das duas extremidades da estrutura, originando a deposição excessiva de areias e a formação do tómbolo em grandezas não pretendidas, que corresponde à retenção de uma parcela significativa do transporte sólido.

Pelo contrário, se o comprimento do quebramar for pequeno relativamente à sua distância à linha de costa, a variação da altura de onda ao longo da praia será reduzida e as correntes de difração poderão não ser suficientes para provocar o transporte das areias no caso do ataque frontal, ou para se opor às correntes longitudinais, no caso da agitação marítima ser oblíqua.

Uma alternativa a um quebramar destacado mais extenso, necessário à proteção de uma linha de costa, poderá ser um sistema de pequenos quebramares separados uns dos outros, colocados num mesmo alinhamento, ou não, como se se tratasse de um quebramar destacado auxiliar, localizado atrás da abertura de dois quebramares sucessivos, como pretende ilustrar a Figura 2.6 (Taveira-Pinto, 2001). A construção de quebramares assegura a fixação da linha de costa na sua cobertura, mas a sotamar da obra, devido ao fluxo sedimentar, dá-se o recuo da mesma, iniciando-se desta forma um processo de erosão provocada pela obra de defesa.



a) Conjunto de quebramares (linha vermelha a tracejado representa a eventual forma da linha de costa mais homogénea)



b) Necessidade de utilização de esporões de forma a conter o efeito dos quebramares destacados na costa

Figura 2.6 - Efeito secundário da utilização de um conjunto de quebramares destacados

A linha vermelha (Figura 2.6a) representa, de forma simplificada, a linha de costa antes dos quebramares. Através desta evidenciam-se as consequências, tanto as positivas como as negativas, a nível morfológico com a construção desta linha defensiva, onde existe uma proteção da costa e a formação e a acumulação de areal nas costas dos quebramares, mas também um maior recuo da linha de costa na zona entre as estruturas. Torna-se então

evidente que, para se colmatar o problema da erosão provocada a sotamar com a construção do quebramar se constroem mais, tornando-se assim um problema sequencial. É então importante a clarificar o comportamento esperado na linha de costa com diferentes opções a nível estrutural.



COMPORTAMENTO TRANSVERSAL: ESPRAIAMENTO

As ondas ao longo do seu percurso sofrem vários processos de propagação. O último destes processos corresponde ao espraio, que ocorre depois da rebentação da onda e dá-se sobre a fronteira sólida terrestre. O espraio define a cota máxima atingida, em relação ao nível de repouso, por uma onda marítima, na interação com o talude de uma praia ou estrutura costeira. Depois de atingida a cota máxima dá-se o refluxo, onde a massa fluida de espraio sofre agora um transporte de retorno, correspondendo ao refluxo “máximo” a cota mais baixa atingida. De referir que estas distâncias de espraio e refluxo são medidas na vertical, como ilustra a Figura 3.1 (Pereira, 2008).

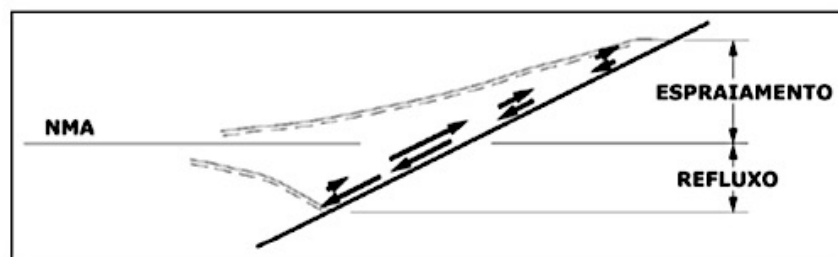


Figura 3.1 - Fenómeno de espraio e refluxo (Pereira, 2008)

A quantificação do espraio é importante na determinação da parte ativa de um perfil de praia e também no projeto de obras costeiras. Se a cota de máximo espraio exceder a cota de coroamento de estruturas (quebramares, enrocamentos, etc.), ocorre o galgamento. O fenômeno de espraio é dependente da reflexão das ondas e dos efeitos tridimensionais da batimetria, bem como da porosidade, rugosidade, permeabilidade e do nível freático (Coelho, 2005). Assim, o espraio tem um comportamento diferente dependendo do tipo de costa que encontra. A altura máxima atingida é diferente existindo um perfil de praia natural ou um perfil de praia com uma obra rígida de proteção costeira.

A estimativa da altura de espraio pode ser realizada através de diferentes formulações de carácter empírico. As diferentes formulações apresentam diversos parâmetros na sua estrutura, variando essencialmente o campo de aplicação da formulação, em função do tipo de fronteira costeira (Teixeira, 2014).

Ocorre galgamento sempre que a cota de espraio de uma onda é superior à cota de coroamento da fronteira sólida onde a onda incide. Os galgamentos geralmente ocorrem no decurso de temporais, com a sobre-elevação do nível do mar, o aumento da altura das ondas e a amplificação da força dos ventos, que favorecem a invasão da faixa costeira (Freitas,

2010). Com o objetivo de identificar situações de galgamento através da comparação da altura de onda incidente na estrutura com o respetivo nível de espraio máximo, testaram-se diferentes cenários de agitação, tanto para praias naturais como praias com obras longitudinais aderentes ou quebramares destacados. Para tal, foi analisado um perfil de praia genérico inicialmente adotado, 9 alturas de onda incidentes na costa com 3 períodos associados a cada uma delas, resultando em 27 cenários de agitação. Para os casos com obras de defesa costeira, realizou-se a análise conjugando os cenários de agitação com as características físicas das estruturas, resultando em 108 combinações para as obras longitudinais aderentes e 324 combinações para os quebramares destacados.

3.1 Praia Natural

Tendo em conta o diferente comportamento do espraio em função das características do perfil de praia, para a análise genérica dos galgamentos nas estruturas de defesa costeira foi inicialmente definido o perfil de praia. Segundo Dean (1997), os perfis sofrem variadas ações e são o produto de um complexo sistema de forças e processos, incluindo o suprimento de sedimentos e a hidrodinâmica. Se o sistema de forças se puder manter constante, parece ser razoável, que o sistema do perfil de praia tenda a um equilíbrio tridimensional, logo este torna-se de mais fácil previsão.

3.1.1 Considerações iniciais

A equação postulada por Dean (1977) expressa a profundidade (h) de um ponto a uma distância horizontal do início do perfil proposto (y), a partir de um parâmetro que depende do diâmetro mediano do sedimento (A). Este modelo sugere uma declividade média para representar todo o perfil de praia (Gomes, 2004). Para traçar o perfil de praia modelo utilizou-se a Equação 3.1.

$$h = A * y^{2/3} \quad (3.1)$$

Neste estudo foi considerado o valor de $A=0.127$, correspondendo a um diâmetro mediano dos sedimentos de aproximadamente 0.3mm. O resultado da aplicação da Equação 3.1 corresponde à parte submersa do perfil total de praia genérico avaliado ao longo deste estudo.

Para a parcela emersa do perfil foi definido um talude com declive constante de 8% (4.57°) até à cota que define o limite da praia, o que corresponde a uma extensão de praia emersa (entre as cotas +2m e +7m) de 62.55m. Supôs-se a superfície do nível do mar à cota +2m e a cota máxima do perfil de praia de +7m. Desta forma, o perfil genérico adotado para a praia natural corresponde na parte submersa ao perfil de Dean, para $A=0.127$, e para cotas superiores a 0m corresponde a um talude com inclinação constante de 8% (Figura 3.2).

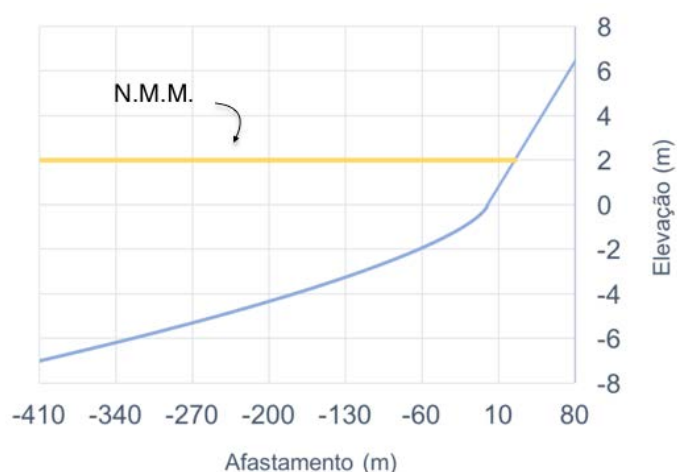


Figura 3.2 - Perfil de praia adotado

3.1.2 Cálculo do Espraimento

Teixeira (2014) testou varias formulações de espraimento, tanto de praias naturais como praias com estruturas de defesa costeira, conseguindo por fim generalizar um tipo de equação para cada caso. A Equação 3.2, representa o espraimento máximo numa praia natural para uma ondulação considerada como regular, já que este o levantamento feito pelo mesmo autor subdivide o tipo de ondulação.

$$R_{m\acute{a}x} = 2.90 * H_s * \xi \quad (3.2)$$

Esta estimativa de espraimento depende da altura de onda significativa na costa (H_s) e do número de Iribarren (ξ), que se obtém através da Equação 3.3. Quanto à altura significativa da onda, esta corresponde à média do terço de ondas mais altas, e pode ser considerada ao largo ou na zona de rebentação. Esta diferenciação local do conceito de altura significativa

da onda produz resultados que podem variar entre 10% a 15%, quando utilizada para uma mesma formulação (Eurotop, 2007). A definição deste parâmetro segue a Equação 3.3 e as gamas de ocorrência estão de acordo com a Tabela 3.1 seguinte.

$$\xi = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (3.3)$$

Tabela 3.1 - Tipos de onda dependente do valor de Iribarren

<i>Praia/Tipo de rebentação</i>	<i>Progressiva</i>	<i>Mergulhante</i>	<i>Oscilatória</i>
<i>Declive constante</i>	$\xi_0 \leq 0.4$	$0.5 \leq \xi_0 \leq 3.3$	$\xi_0 \geq 3.3$
<i>Barra-fossa</i>	$\xi_0 \leq 0.5$	$0.4 \leq \xi_0 \leq 1.2$	$\xi_0 \geq 1.2$

Com a observação da Tabela 3.1 acima apresentada, entende-se que o aumento do número de Iribarren está associado a ondas mais oscilatórias. No tipo de rebentação progressiva, a onda empola, mantendo praticamente a sua forma simétrica até que uma pequena emulsão de ar-água aparece na crista. A rebentação mergulhante é um processo muito mais rápido e violento de dissipação de energia. Com a diminuição de profundidade, a frente da onda encurta e torna-se cada vez mais inclinada. Para taludes muito íngremes pode ocorrer o tipo de rebentação de fundo ou dita oscilatória (Coelho, 2005). Ao contrário dos dois casos anteriores, não se verifica a instabilidade da crista. Os fenómenos de reflexão adquirem bastante importância para este tipo de rebentação (Martins, 2012).

O tipo de rebentação depende da inclinação da praia (β) e da declividade da onda. Praias suaves são propícias à rebentação progressiva, enquanto que praias declivosas favorecem a rebentação mergulhante. A declividade da onda intervém no sentido de que fortes declividades favorecem a rebentação progressiva, enquanto que ondas de fraca declividade propiciam a rebentação em mergulho (Coelho, 2005).

O parâmetro de Iribarren está indiretamente relacionado com o período de onda, já que o comprimento de onda depende deste. O comprimento de onda (L_s) representa a distância entre duas cristas ou duas cavas da onda. Este parâmetro pode ser calculado utilizando a

Equação 3.4, através da teoria linear das ondas de superfície (Rijn, 1998). Para um espectro ou registo de onda podem-se definir vários períodos, onde os mais convencionais são o período de pico (T_p), o período médio (T_m) e o período significativo (T_s). O período de pico corresponde à frequência com maior densidade espectral enquanto o período médio, calculado a partir do espectro ou registo de onda, é a média dos períodos observados (Eurotop, 2007). Para o cálculo do comprimento de onda (Equação 3.4), como geralmente as ondas são descritas e referenciadas em termos de altura de onda significativa (H_s), no número de Iribarren utiliza-se o período significativo que corresponde à média do terço de ondas mais altas (Cornish, 1898; Lewis, 1931).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (3.4)$$

Desta forma, o espraçamento máximo de uma praia natural com ondulação incidente regular é sensível à alteração dos parâmetros que caracterizam a onda, como o comprimento de onda, que está diretamente relacionado com o período e a altura da onda. Também a inclinação do talude revela interferência no espraçamento em estudo.

Para testar variados tipos de solução e de combinações fez-se variar a altura de onda significativa, o período de onda significativo, e como já referido, escolheu-se uma inclinação de talude de 8%. Quanto à altura de onda, escolheu-se estudar cenários com alturas entre 4 a 12m, espaçados de 1m. Cada altura de onda foi combinada com três valores de período de onda, 8, 10 e 12 segundos, alargando desta forma a margem a conclusões.

A Tabela 3.2 apresenta os cenários avaliados e os valores obtidos para o espraçamento sobre a praia natural ($R_{máx}$), representando o ΔH (m) o nível de espraçamento acima da cota de coroamento do perfil, correspondendo a situações de galgamento. Na coluna de avaliação da altura de galgamento (ΔH) o traço significa que neste cenário não existe galgamento. Todos os restantes valores são referentes à altura galgada para o caso específico.

Tabela 3.2 - Espraçamento para a praia natural com uma inclinação de 8%

H_s (m)	L_s (m)	ξ_{op}	T (s)	$R_{m\acute{a}x}$ (m)	$\triangle H$ (m)
4	99,92	0,400	8	4,63	-
	156,13	0,499	10	5,79	0,79
	224,83	0,599	12	6,95	1,95
5	99,92	0,357	8	5,18	0,18
	156,13	0,447	10	6,48	1,48
	224,83	0,536	12	7,77	2,77
6	99,92	0,326	8	5,68	0,68
	156,13	0,408	10	7,09	2,09
	224,83	0,489	12	8,51	3,51
7	99,92	0,302	8	6,13	1,13
	156,13	0,377	10	7,66	2,66
	224,83	0,453	12	9,20	4,20
8	99,92	0,282	8	6,55	1,55
	156,13	0,353	10	8,19	3,19
	224,83	0,424	12	9,83	4,83
9	99,92	0,266	8	6,95	1,95
	156,13	0,333	10	8,69	3,69
	224,83	0,400	12	10,43	5,43
10	99,92	0,253	8	7,33	2,33
	156,13	0,316	10	9,16	4,16
	224,83	0,379	12	10,99	5,99
11	99,92	0,241	8	7,69	2,69
	156,13	0,301	10	9,61	4,61
	224,83	0,361	12	11,53	6,53
12	99,92	0,231	8	8,03	3,03
	156,13	0,288	10	10,03	5,03
	224,83	0,346	12	12,04	7,04

Em apenas um dos cenários não sucede galgamento, o que acontece para uma onda de altura de 4m e um período de 8s, obtendo-se um valor de espraçamento de 4.63m. Para a mesma altura de onda (Figura 3.3) verifica-se um aumento da altura máxima de espraçamento com o aumento do período de onda. A Figura 3.3 revela, para além de um crescimento do espraçamento máximo, que o período tem um peso significativo na estimativa do espraçamento, já que para a mesma onda, no caso mais extremo ($H_s= 12m$), se obteve uma diferença de 4m entre o espraçamento para um período de 8 e 12s.

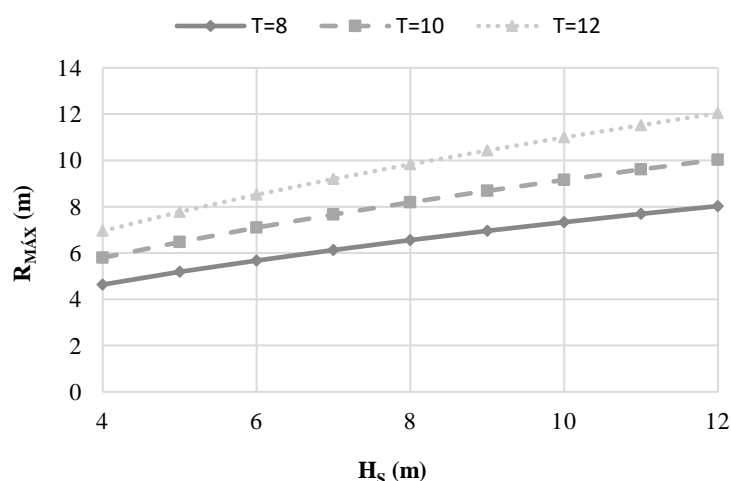


Figura 3.3 - Espraio máximo em função de $H_s(m)$ e $T(s)$

Depois de calculados os valores referentes ao espraio na praia natural que se concebeu para o estudo, em cada um dos cenários de agitação designados, verificaram-se valores acima dos 5m em 96.3% dos casos calculados. Com isto segue-se a implementação de obras rígidas como forma de baixar o espraio e por consequente evitar a ocorrência dos respectivos galgamentos. As obras estudadas, como já referido, são as obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados.

Os valores de espraio na praia natural servem de referência para cada cenário de agitação testado. Desta forma, nos próximos subcapítulos, onde se realiza o estudo da eficácia das obras longitudinais aderentes e dos quebramares destacados, os cenários de agitação são os mesmos, para que seja possível testar o desempenho das intervenções.

3.2 Obra Longitudinal Aderente

Para ser feita uma análise do comportamento transversal deste tipo de solução é necessário fixar inicialmente certos parâmetros ao nível do contexto em que se insere o perfil da estrutura. Na Figura 3.4 apresenta-se o perfil tipo utilizado, com as dimensões base. A cota de coroamento, fixou-se nos +7m, considerando que o N.M.M. está a +2m, e mantendo como diferença os 5m anteriormente adotados.

Das dimensões acima apresentadas no perfil tipo, apenas a inclinação do talude será testada com outros valores, assumindo quatro inclinações geralmente utilizadas neste tipo de solução ($V/H = \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}$ e $\frac{1}{1}$). Quantifica-se a área transversal de cada solução, representada através da nomenclatura A_t (m^2), que varia consoante a inclinação considerada, pois a espessura da estrutura mantém-se sempre nos 2.5m, já que não representa um parâmetro diferenciador na análise em questão.

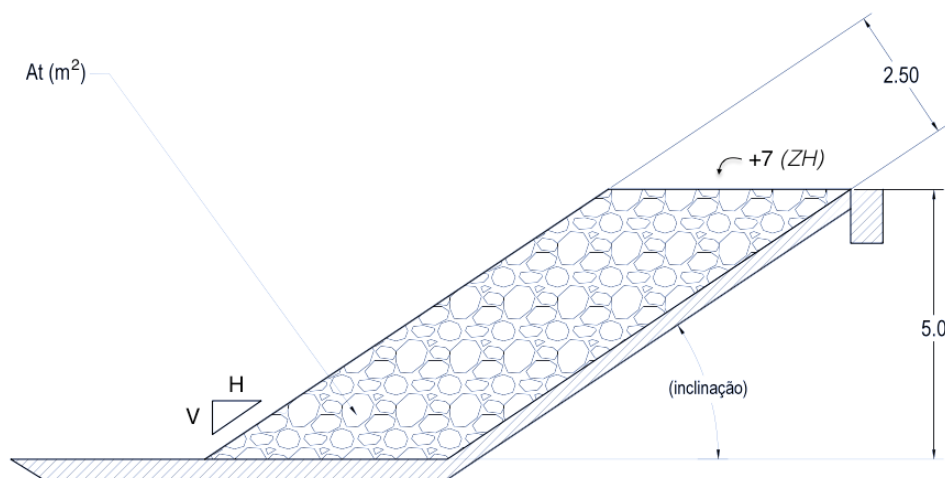


Figura 3.4 - Perfil tipo de obra longitudinal aderente

Com a alteração da inclinação alteram-se as dimensões da estrutura, assim como o A_t correspondente. Assim sendo, apresenta-se na Figura 3.5 as dimensões obtidas por perfil, alterando a inclinação, mas mantendo a cota de coroamento como inicialmente se definira. Desta forma as soluções de maior inclinação são aquelas que possuem uma menor área de seção transversal e necessitam de uma menor área de implantação, obtendo-se assim uma menor distância de constato com a onda em fase de espraçamento.

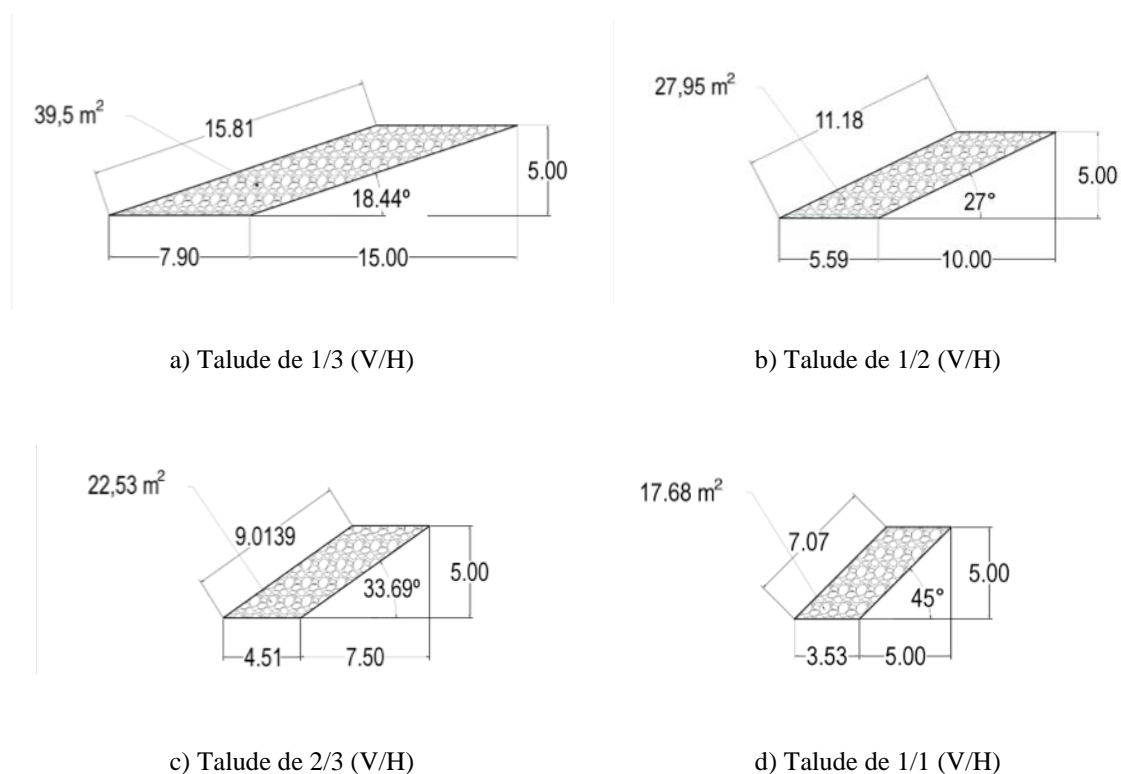
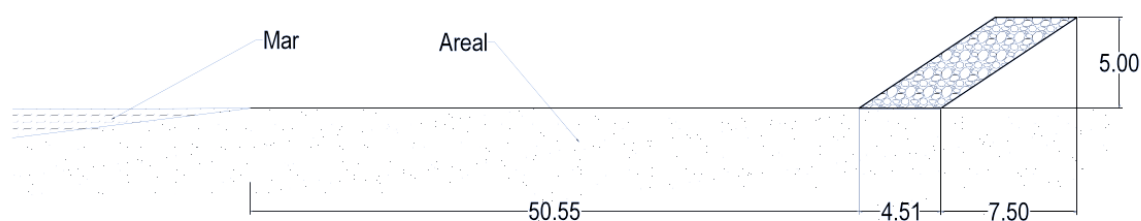
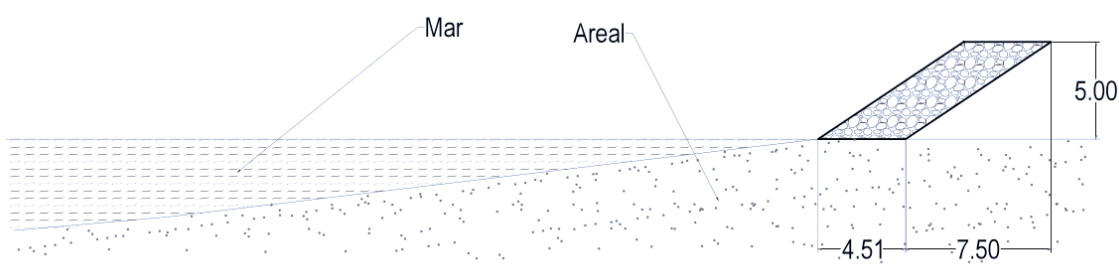


Figura 3.5 – Perfis transversais utilizados na caracterização de obras longitudinais aderentes, com as respectivas dimensões e áreas transversais, por inclinação

Neste tipo de obra, a inclinação escolhida fará a diferença no resultado final, já que se pressupõe que associado à construção da estrutura existe uma perda de areal no decorrer temporal na frente da mesma, onde com o aumento da inclinação adotada a linha de costa tende a recuar mais. Associado a esta perda de areal está a eficácia da obra, já que a distância que a onda incidente percorre no seu ato de espraçamento tende a ser menor, chega a uma altura que não beneficia do areal para ajudar no espraçamento. A Figura 3.6 ilustra o que aqui se indica. Esta consideração representa uma análise objetiva relativamente ao espraçamento associados às obras longitudinais aderentes, onde se considera que as ondas incidem diretamente na estrutura.



a) Perfil de praia inicial com a implantação da obra longitudinal aderente



b) Perfil de praia com o passar do tempo depois da implantação da obra longitudinal aderente

Figura 3.6 - Recuo da linha de costa com a implantação da obra longitudinal aderente em linha de costa com areal

3.2.1 Cálculo do Espraçamento

Assim como para a situação da praia natural, para o cálculo do espraçamento na obra longitudinal aderente consultaram-se os resultados de Teixeira (2014). Como referido, este autor realizou testes de espraçamento para praias naturais e praias com obras de defesa costeira, tendo avaliado um total de 60 formulações.

Depois de trabalhar as formulações referentes ao espraçamento sobre taludes de obras de defesa, concluiu que o valor de espraçamento máximo que se obteria pela Equação 3.5.

$$R_{m\acute{a}x} = 0.41 * H_S * \xi \quad (3.5)$$

Esta equação depende dos parâmetros já utilizados na Equação 3.2, onde apenas se altera o coeficiente empírico, aproximadamente 7 vezes menor, para as mesmas condições, numa praia com uma obra de defesa costeira do que quando apenas existe a praia natural. O

espraçamento acaba por não ter diretamente a mesma proporção já que o parâmetro de Iribarren (Equação 4.3) varia conforme a inclinação do talude.

Na Tabela 3.3, apresentam-se os valores relativos aos cálculos do espraçamento sobre as quatro inclinações do talude das obras longitudinais aderentes estudadas, onde se regista a altura de galgamento em cada cenário analisado.

Tabela 3.3 - Valores obtidos para cálculo do espraçamento e verificação ao galgamento

H_s (m)	L_s (m)	T (s)	R_{máx}							
			1/3 (V/H)	ΔH (m)	1/2 (V/H)	ΔH (m)	2/3 (V/H)	ΔH (m)	1/1 (V/H)	ΔH (m)
4	99,92	8	2,73	-	4,10	-	5,46	0,46	8,19	3,20
	156,13	10	3,42	-	5,12	0,12	6,83	1,83	10,24	5,25
	224,83	12	4,10	-	6,15	1,15	8,19	3,20	12,29	7,30
5	99,92	8	3,05	-	4,58	-	6,11	1,11	9,16	4,16
	156,13	10	3,82	-	5,73	0,73	7,63	2,64	11,45	6,46
	224,83	12	4,58	-	6,87	1,87	9,16	4,16	13,74	8,75
6	99,92	8	3,35	-	5,02	0,02	6,69	1,69	10,03	5,04
	156,13	10	4,18	-	6,27	1,27	8,36	3,37	12,54	7,55
	224,83	12	5,02	0,02	7,53	2,53	10,03	5,04	15,05	10,06
7	99,92	8	3,61	-	5,42	0,42	7,22	2,23	10,84	5,84
	156,13	10	4,52	-	6,78	1,78	9,03	4,04	13,55	8,55
	224,83	12	5,42	0,42	8,13	3,13	10,83	5,84	16,26	11,27
8	99,92	8	3,86	-	5,80	0,80	7,54	2,54	11,59	6,59
	156,13	10	4,83	-	7,25	2,25	9,66	4,66	14,49	9,49
	224,83	12	5,80	0,80	8,69	3,69	11,59	6,59	17,38	12,39
9	99,92	8	4,10	-	6,15	1,15	8,19	3,20	12,29	7,30
	156,13	10	5,12	0,12	7,68	2,68	10,24	5,25	15,36	10,37
	224,83	12	6,15	1,15	9,22	4,22	12,29	7,30	18,44	13,44
10	99,92	8	4,32	-	6,48	1,48	8,64	3,64	12,96	7,96
	156,13	10	5,40	0,40	8,10	3,10	10,80	5,80	16,20	11,20
	224,83	12	6,48	1,48	9,72	4,72	12,96	7,96	19,44	14,44
11	99,92	8	4,53	-	6,80	1,80	9,06	4,06	13,59	8,59
	156,13	10	5,66	0,66	8,50	3,50	11,32	6,33	16,99	11,99
	224,83	12	6,80	1,80	10,19	5,19	13,59	8,59	20,38	15,39
12	99,92	8	4,73	-	7,10	2,10	9,46	4,46	14,19	9,20
	156,13	10	5,92	0,92	8,87	3,87	11,83	6,83	17,74	12,75
	224,83	12	7,10	2,10	10,65	5,65	14,19	9,20	21,29	16,30

Fazendo uma análise geral, com o aumento da inclinação da obra aumenta também a altura de espraçamento associada. Quando analisados os resultados por inclinação, nota-se que a solução com uma inclinação de $1/3$ (V/H) é a mais eficaz, já que não existem galgamentos em aproximadamente 60% dos cenários testados. Se se separar as alturas de onda por período, e se se observar apenas o de 8s, esta solução é 100% eficiente.

Na solução com uma inclinação de talude de $1/2$ (V/H) ocorrem bastantes mais galgamentos que na inclinação anteriormente calculada. Nesta, o espraçamento máximo é menor que 5m apenas para duas das combinações, a onda de 4 e de 5m com um período de 8s. Em todas as restantes a altura de espraçamento é superior à cota de coroamento da estrutura. A eficácia desta solução na mitigação de galgamento nos cenários avaliados é de 7%.

Com a inclinação de $2/3$ (V/H), o espraçamento máximo volta a aumentar relativamente à inclinação $1/2$ (V/H), onde passam a deixar de existir cenários em que não suceda galgamento, independentemente do período de onda. Se se fizer uma análise por altura de onda, é perceptível que a altura de onda espraçada, com esta inclinação de talude da obra, é superior à própria altura de onda inicial. Por exemplo, para uma onda de 4m e um período de 10s a altura de espraçamento máximo é de 4.17m. O aumento da inclinação do talude resulta num maior parâmetro de Iribarren.

Para a inclinação de $1/1$ (V/H) mantém-se o mesmo padrão que se registou sempre que se aumentou a inclinação, aumentando consequentemente os espraçamentos máximos obtidos. Neste caso específico, os valores de espraçamento máximo são ainda mais altos, onde para uma onda incidente de 4m com um período de 8s se obteve uma altura máxima espraçada de 8.20m, correspondendo o valor espraçado a cerca do dobro da altura de onda incidente. Seguidamente apresentam-se os gráficos na Figura 3.7, que relacionam o espraçamento máximos esperado ($R_{m\acute{a}x}$) e a altura de onda incidente por inclinação da obra longitudinal aderente.

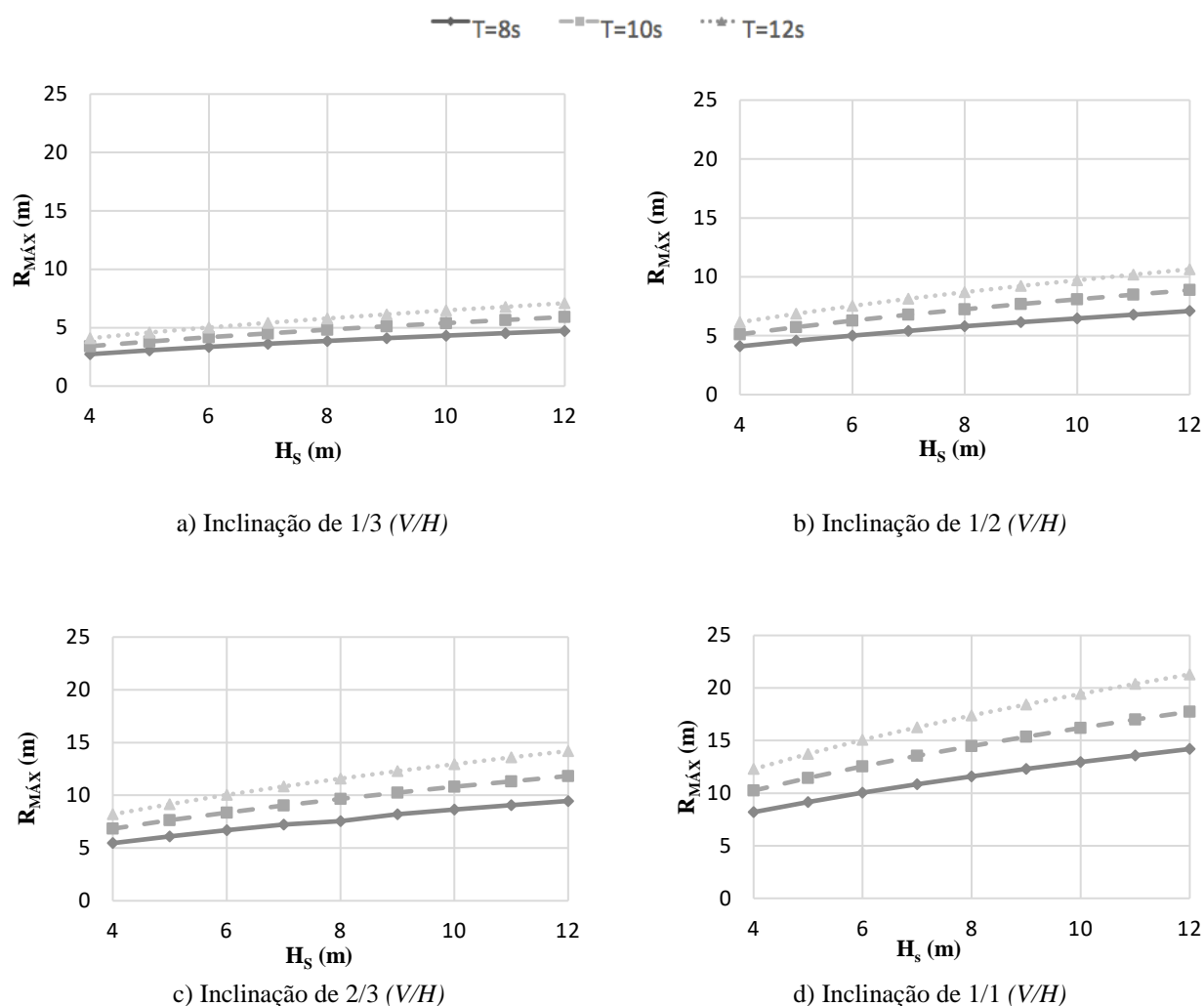


Figura 3.7 – Espraçamento máximo em função da altura de onda e do período

Como na situação da praia natural, é possível também ter a percepção de que diferença entre valores de espraçamento máximo para a mesma onda com períodos diferentes aumenta para maiores valores de onda incidente, o que implica que o período tem maior relevância para ondas maiores, já que mais afeta o espraçamento nestes casos, independentemente do tipo de inclinação que a obra assuma. No que diz respeito ao rendimento de cada uma delas, e entenda-se por maior rendimento a maior redução da altura de espraçamento comparativamente com o que aconteceria no cenário sem obra, esta é diferente em cada solução. Obteve-se um padrão de perda de rendimento com o aumento da inclinação do talude, com a diminuição da eficiência na redução da altura de espraçamento, já que a inclinação 1/3 (V/H) revela o maior rendimento obtido, registado uma diminuição do espraçamento com a presença da obra de 41.04%.

Na solução da imagem da Figura 3.7b reduziu-se a altura de espraçamento em cerca de 11.56%, comparativamente à praia natural. Existiu uma perda de percentagem entre a atual solução calculada e a anterior. Embora se tenha aumentado a inclinação do talude e para maiores inclinações aumenta a resistência ao espraçamento, diminui a distância que a agitação percorre até atingir a cota +7m (ZH). Desta forma, como percorre a mesma altura num menor espaço o rendimento da obra diminui. Esta perda de rendimento com o aumento de inclinação faz-se notar nos resultados obtidos, de tal forma que na inclinação 2/3 (V/H) tem um rendimento negativo, onde o cenário sem obra tem alturas de espraçamento 17.92% menores.

O cenário mais extremo obtido que ilustra bem a influência da estrutura nos galgamentos é referente à inclinação 1/1 (V/H) para uma onda de 12m e 12s de período, onde se obteve um espraçamento de 21.23m com uma altura galgada de 16.23m. Para a mesma agitação, no cenário de referencia registou-se apenas 7m de altura galgada. Regista-se assim nesta solução um rendimento negativo na redução do espraçamento e uma eficácia zero na mitigação dos galgamentos.

3.2.2 Aumento da cota de coroamento

Assumindo que não existem restrições impostas a nível de altura de coroamento da obra longitudinal aderente, a cota de coroamento da estrutura foi elevada para que esta consiga colmatar os galgamentos máximos verificados na análise anterior, pelo que se a altura galgada fosse por exemplo +2.23m, a cota de coroamento atingiria neste caso os 9.23m (ZH). O aumento da solução segue o perfil de presente na Figura 3.8, onde o que é acrescentado se encontra acima da linha a tracejado vermelho. Acima desta, o que se encontra representado a contornos azuis ilustra toda a área transversal necessária para a realização do acréscimo à cota de coroamento da altura galgada, que se assume com a forma trapezoidal. A distância de recuo horizontal que se considera em cada acréscimo realizado está dependente da linha a tracejado preta de forma a manter estabilidade da estrutura no acréscimo efetuado. A espessura considerada manteve-se como nos cenários anteriormente considerados, de 2.5m.

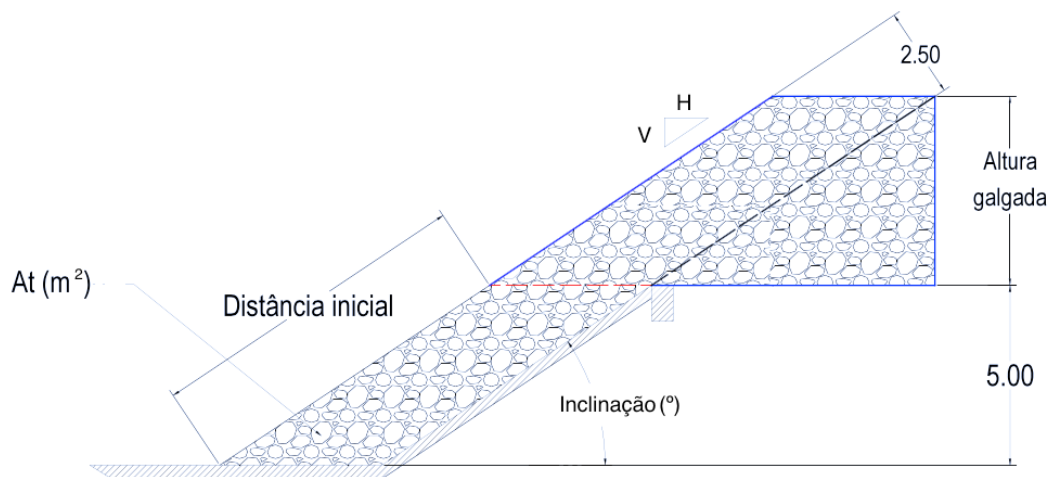


Figura 3.8 – Perfil da solução com aumento da cota de coroamento de fora a colmatar os galgamentos (2/3 (V/H))

Em cada uma das soluções analisadas, seguiu-se o procedimento registrado no perfil acima, permitindo o cálculo da nova A_t , possibilitando uma comparação entre inclinações com o aumento da altura de onda. Nos gráficos que representam os valores de área transversal obtidos (Figura 3.9), as linhas horizontais correspondem às situações em que não se verificam galgamentos com a estrutura à cota de coroamento +7 (ZH) e por isso não houve necessidade de aumentar o coroamento da estrutura.

Verifica-se, nos resultados obtidos presentes na Figura 3.9, que o período associado à onda incidente tem importância na resposta obtida, que resulta em maiores alturas de coroamento a maiores valores de T , e consequentemente maiores áreas transversais das estruturas para colmatar galgamentos. Ao se analisar apenas o gráfico do período médio testado, Figura 3.9b ($T=10s$), entende-se que a inclinação 1/3 (V/H), a azul, é a que apresenta uma melhor resposta, já que só a partir da onda de 9m de altura é que necessita de aumentar a cota e mesmo assim é a que apresenta menor A_t na maior parte do gráfico. Contudo existem duas soluções que para os valores $H_s=4$ e 5m compensam já que apresentam ligeiramente um menor A_t que a inclinação 1/3 (V/H).

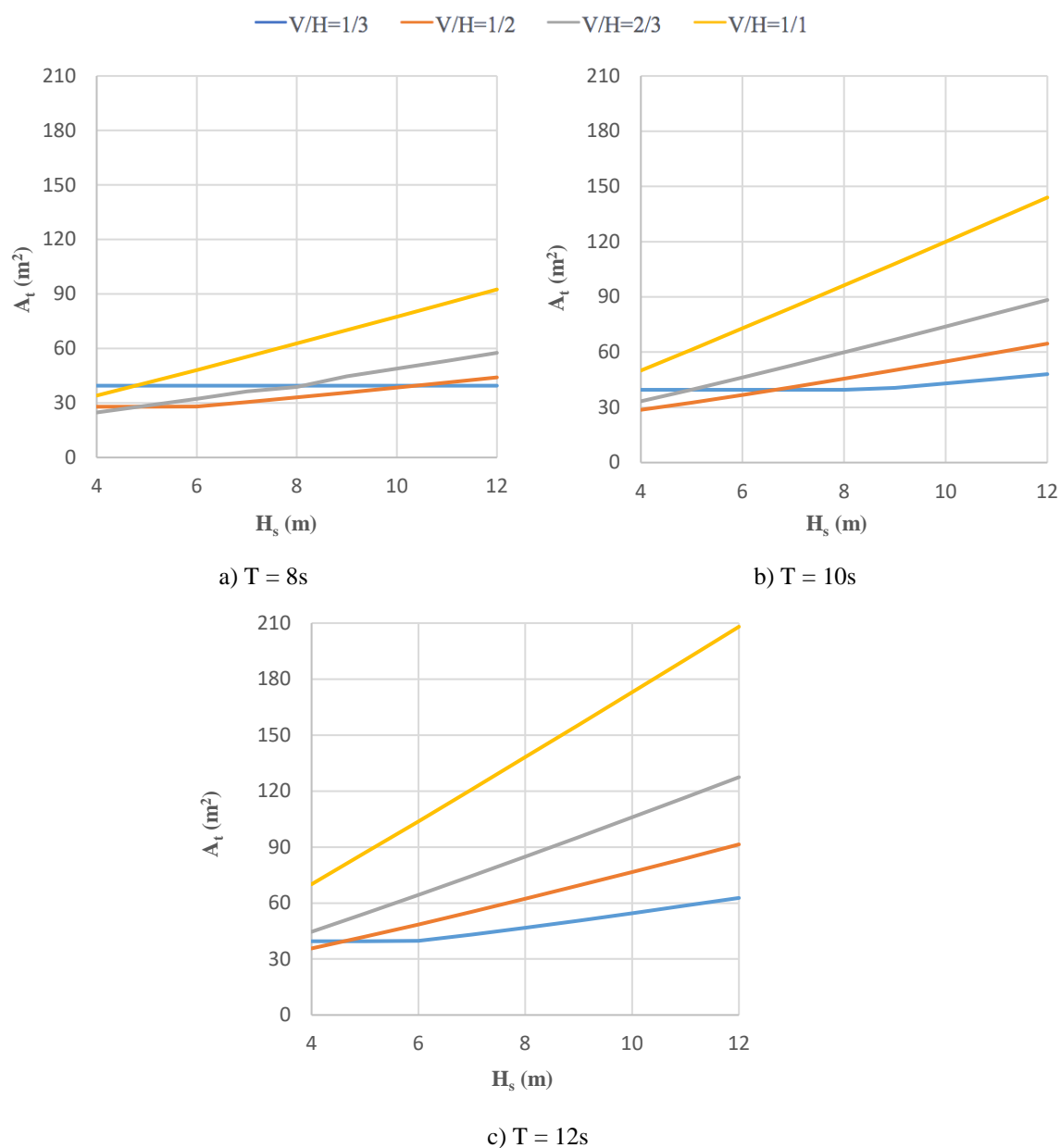


Figura 3.9 – Relação da área transversal mínima para mitigar galgamentos com a altura de onda, por inclinação

3.2.3 Discussão de Resultados

De forma a consolidar alguma informação e facilitar a comparação, apresentam-se na Figura 3.10 os resultados obtidos em relação às quatro inclinações de taludes das obras testadas.

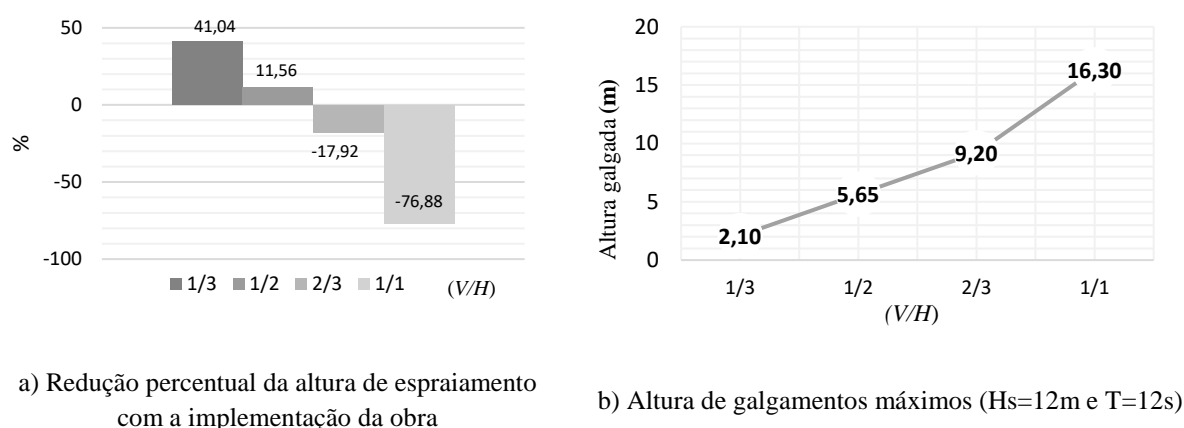


Figura 3.10 – Desempenho das obras longitudinais aderentes em função da inclinação do talude

Verifica-se, num plano geral, que independentemente da inclinação do talude da solução existe um aumento dos galgamentos, tanto com o aumento da altura de onda incidente, como com o aumento do período de onda, sendo este último mais influente para ondas de maior altura. Quanto maior for a inclinação do talude da obra imposta, menor será a redução da altura de onda espraçada (Figura 3.10). Existe uma evidente perda de rendimento entre o cenário com e sem obra que se regista com o aumento da inclinação do talude analisado, onde as estruturas passam a ter cada vez menos capacidade de reduzir o espraioamento e menos eficácia na mitigação dos galgamentos registados. Na comparação entre soluções, Figura 3.10a, entende-se que as inclinações mais íngremes não apresentam um comportamento positivo dentro do contexto analisado, sem qualquer eficácia registada na mitigação de galgamento e aumentando o espraioamento, quando comparado com o cenário de referência. Diretamente associado a este facto está o aumento a altura do galgamento máximo previsto com o aumento da variação da inclinação da obra (Figura 3.10b). Nesta figura apresentam-se os valores máximos de galgamento obtidos para a situação mais desfavorável de clima de agitação testado.

Em suma, para este tipo de solução, se existir espaço para construir uma obra de menor inclinação deve ser a opção tomada, já que com o aumento da inclinação se perde rendimento na redução de espraioamento e eficácia na mitigação de galgamentos, obrigando a aumentar a cota de coroamento da estrutura quando esse for o objetivo.

3.3 Quebramar Destacado Submerso

Outra estrutura de defesa costeira que permite mitigar galgamentos na linha de costa são os quebramares destacados, podendo ser, como anteriormente mencionado, emersos ou submersos. São opções com diferentes aplicabilidades, já que têm diferentes resultados e diferentes custos associados. No caso de estudo em questão, avaliaram-se aquelas soluções em que a cota de coroamento não ultrapasse o N.M.M. As estruturas galgáveis possuem no seu dimensionamento dois aspetos essenciais a considerar: a estabilidade e a transmissão da agitação. A estabilidade deste tipo de estruturas é, por vezes, maior do que a das estruturas não galgáveis, dado que a agitação pode propagar-se sobre o coroamento da estrutura, dissipando-se uma parte da energia e dando origem a ações de menor intensidade sobre a camada resistente do talude exterior (Debski e Loveless, 1997).

O coeficiente de transmissão é determinado através do balanço entre a energia da onda incidente (imediatamente antes do quebramar) e a energia da onda transmitida (imediatamente após o quebramar - H_t), estando a energia da onda diretamente relacionada com a altura de onda. No caso de quebramares submersos, considera-se que a transferência de energia é dominada pelo efeito de dissipação da rebentação da onda, sendo que, para quebramares emersos, onde o galgamento não é admissível, a transmissão de energia através da estrutura é o que mais afeta o coeficiente de transmissão. Variantes como a altura de onda incidente (H_s), largura do coroamento do quebramar (B), a profundidade de coroamento (R_c) e o tamanho dos blocos utilizados nas camadas de manto resiste (D_{n50}) alteram o coeficiente de transmissão da estrutura e desta forma a sua eficiência, podendo ser quantificado em função de diferentes propostas (Debski e Loveless, 1997; Nunes, 2012).

$$K_t = f\left(\frac{H_s}{H_t}, \frac{R_c}{h}, \frac{D_{n50}}{h}, \frac{B}{L}, \xi\right) \quad (3.6)$$

Taveira-Pinto (2001), apresenta as relações que considera relevantes na análise aos quebramares destacados submersos, já que a transmissão da agitação está relacionada com as características físicas. Assim, para o mesmo autor, os parâmetros a considerar no estudo da transmissão da agitação são os seguintes:

- Altura relativa do coroamento: R_c / D_{n50}
- Altura relativa de onda: H_s / D_{n50}

- Declividade aparente da onda: S_{op}
- A largura relativa do coroamento: B / D_{n50}

Desta forma pretende-se calcular o coeficiente de transmissão (K_t) do quebramar submerso em estudo, para ser possível ter a noção de quais são as características de onda que resultam da passagem destas pelo quebramar. Na Figura 3.11 ilustra-se o perfil tipo desta solução, com as nomenclaturas das características associadas a esta análise que se pretendem variar, onde o R_c representa a distância entre o coroamento e o N.M.M., o B a largura de coroamento, o d o afastamento à linha de costa e a inclinação das margens representado pela relação V/H .

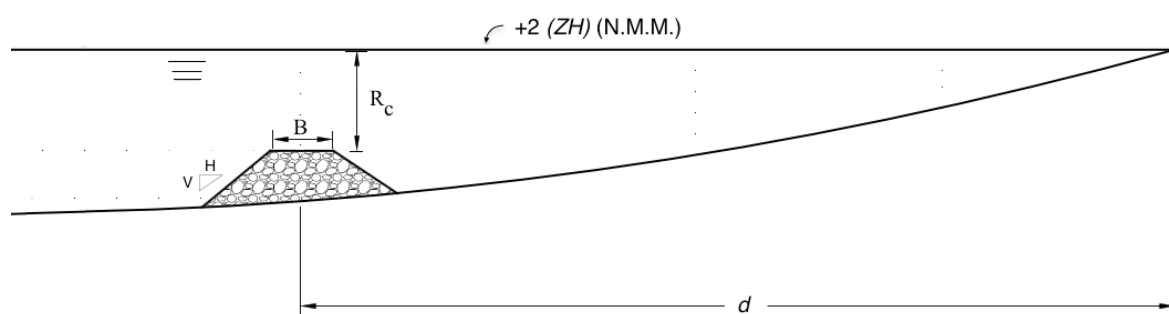


Figura 3.11 - Perfil tipo de quebramar destacado submerso

Um dos aspetos fundamentais a verificar neste tipo de estruturas é a cota de coroamento, que, dependendo do tipo de quebramar escolhido como solução (emerso ou submerso), deverá assumir diferentes cotas. A cota de coroamento também se revela um parâmetro condicionante na eficiência da estrutura e será tanto maior, quanto menor forem os galgamentos que o quebramar permite. Do ponto de vista estético e de volume de materiais utilizados, essa cota deverá ser relativamente baixa. Esta terá que ser também relacionada com a variação dos níveis de maré, principalmente se estes forem significativos, pois não só afetam o aspeto paisagísticos, como condicionam o seu funcionamento (Taveira-Pinto, 2001). Para o estudo em causa e, mantendo-se sempre submersa, a cota de coroamento do quebramar, assumiram-se cotas entre 1 e -4m, o que corresponde à distância entre a superfície livre da água e o coroamento do quebramar submerso entre 1 e 6m. A altura da

estrutura (h_c) variou desde um mínimo de 1m até ao máximo de 6m, já que a posição da estrutura foi fixada a 3 diferentes profundidades ($p=3, 5$ e $7m$), consideração importante também na análise do comportamento em planta (capítulo 4). Com o perfil de praia traçado inicialmente, as profundidades analisadas associam-se a distâncias concretas do afastamento da estrutura, mais precisamente 115, 247 e 410m da linha costa (até ao eixo da estrutura).

Outro dos fatores mencionado como variável no perfil acima exemplificado é a inclinação do talude da estrutura. De maneira a ter as mesmas bases, as inclinações testadas mantiveram-se as utilizadas na obra longitudinal aderente antes calculada (V/H de $1/3, 1/2, 2/3$ e $1/1$). As inclinações descritas foram consideradas iguais em ambas as faces inclinadas do quebramar.

Realizaram-se testes de sensibilidade quando a utilização de fórmulas do coeficiente de transmissão dos quebramares que continham a largura de coroamento, e constatou-se que não seria tão apropriado para o presente caso de estudo realizar estruturas com larguras de coroamento superiores a 15m. Nunes (2012) realizou os seus testes a quebramares destacados, onde fez variar esta distância até uma largura máxima de 100m. Com base nos valores obtidos por este autor, uma rápida análise de sensibilidade a este parâmetro e com o objetivo de verificar a importância da profundidade do coroamento em soluções submersas, adotaram-se os valores de 5, 10 e 15m para a largura de coroamento.

A escolha dos materiais para a construção de obras de defesa costeira influencia significativamente a longevidade de um projeto (Pereira, 2008). Os quebramares destacados são frequentemente materializados em enrocamento, com aplicação em simultâneo ou não de geotêxteis, não excluindo a possibilidade de serem utilizados blocos de betão. Tendo em conta o peso que o tipo de enchimento do núcleo resistente da estrutura possa ter, este parâmetro também se fez variar para testar a sensibilidade das fórmulas relativamente a este aspeto. Utilizou-se então dois tipos diferentes de massas médias para o manto resistente, M_{50} a que corresponde um determinado valor de diâmetro nominal dos blocos, D_{n50} :

- 2800 kg que corresponde a um D_{n50} de 1.019m
- 4000 kg que corresponde a um D_{n50} de 1.147m

Com a presença de algumas variáveis intervenientes no cálculo do K_t , constatou-se, depois de um levantamento relativo à formulação mais adequada para o seu cálculo, que existem na atualidade diversas formas de o estimar. Contatou-se também que nem todas são dependentes das mesmas variáveis. Assim, foi feito o levantamento das formulações mais relevantes para as especificações impostas à partida, com o intuito, não só de ter uma maior sensibilidade da importância da variação de cada fator interveniente, mas também possuir uma vasta gama de valores que permita escolher qual a formulação que mais se adequa para a continuação do estudo. Em qualquer das fórmulas utilizadas foi analisada a sensibilidade de cada variável.

3.3.1 Coeficiente de transmissão por Van der Meer & Daemen

Van der Meer e Daemen (1994), na sua análise para a elaboração da formulação do coeficiente de transmissão, tiveram em conta a altura de onda incidente sobre a estrutura, H_s , o comprimento de onda ao largo, L_{op} , a profundidade do coroamento, R_c , e a largura do coroamento, B . Com as variáveis apresentadas estabeleceram relações para a definição do coeficiente K_t , em função da declividade, S_{op} , e da influência de outros fatores, nomeadamente, R_c/Dn_{50} .

$$K_t = \left(0,031 \times \frac{H}{Dn_{50}} - 0,24\right) \frac{R_c}{Dn_{50}} - 5,42 S_{op} + 0,0323 \times \frac{H_s}{Dn_{50}} - 0,0017 \times \left(\frac{B}{Dn_{50}}\right)^{1,84} + 0,51 \quad (3.7)$$

Para poder ser aplicável, têm que ser verificadas as condições que validam a sua utilização. Estas estão dependentes das variáveis: H , Dn_{50} e S_{op} e são as que abaixo de apresentam.

$$1 < \frac{H}{Dn_{50}} < 6 \quad \text{e} \quad 0,01 < S_{op} < 0,05 \quad (3.8)$$

A fórmula avançada por Van der Meer e Daemen (1994) é apenas válida num intervalo de valores de K_t entre 0.075 e 0.75. As variações impostas resultaram numa gama de resultados extensa. Na Tabela 3.4 ilustra-se o coeficiente de transmissão para um quebramar com 5m de largura, para uma onda incidente de 4m, com o período de 8s e Dn_{50} de 1.019.

Tabela 3.4 - Valores de coeficiente de transmissão para um $B=5m$, $Dn_{50}=1.019m$, $H_s=4m$ e $T=8s$

d (m)	R_c (m)	K_t
115	1	0,456
	2	0,555
247	1	0,456
	2	0,555
	3	0,654
	4	0,753
410	1	0,456
	2	0,555
	3	0,654
	4	0,753
	5	0,852
	6	0,951

Os resultados revelam que esta fórmula não se aplica a 100% dos casos de estudo que se pretendem efetuar, já que para valores de agitação mais acentuados, com ondas incidentes a partir de 9m, deixa de ser respeitado o intervalo do S_{op} , com resultados superiores a 0.05. Isto acontece com o primeiro valor de D_{n50} (1.019m), já que com 1.147 o intervalo apenas deixa de ser respeitado para ondas incidentes de 12m de altura. A seguir apresentam-se os gráficos nas Figuras 3.12 e 3.13 que mostram o comportamento das variáveis e o seu grau de sensibilidade quando alteradas.

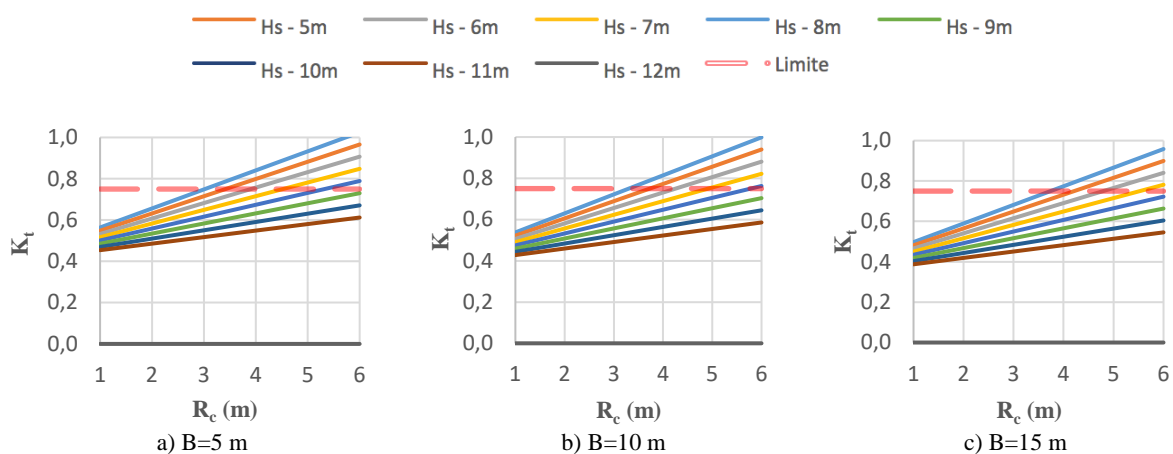
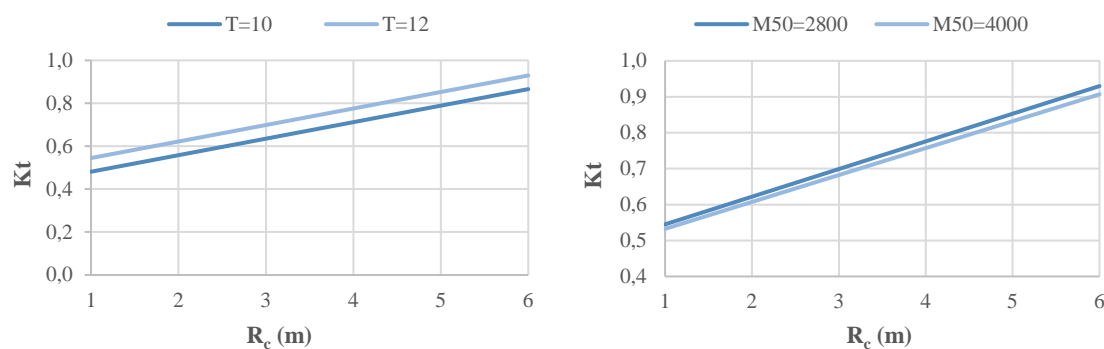


Figura 3.12 - Variação do K_t em função de H_i onde se fixaram: $d=7m$, $T=12s$ e $Dn_{50}=1.15m$

Com linha a tracejado vermelha, nos gráficos acima apresentados, representa-se o limite até ao qual a fórmula admite valores. Acima desta linha os resultados obtidos não se encontram dentro dos limites de aplicação da formulação.



a) Variação do período (s)

b) Variação do M_{50} (m)Figura 3.13 – Análise de sensibilidade com variáveis fixas: $B=5m$, $d=7m$ e $H_s=6m$

Com a observação dos gráficos é possível ter perceção do comportamento dos resultados da fórmula quando se mantêm certas variáveis e se alteram outras. Com os gráficos iniciais, da Figura 3.12, nota-se uma tendência para a diminuição do K_t com o aumento da onda incidente, já que as linhas destes gráficos vão diminuindo de inclinação de cima para baixo. No que toca aos valores obtidos segundo a variação da largura de coroamento, estes demonstram que o B não tem um grande peso nesta formulação, já que com o aumento de 10m na sua largura (de 5 para 15m) o resultado do K_t apenas variou 0.067, para a mesma onda. Testada a sensibilidade do período, na Figura 3.13a, revela-se que a mesma onda, com um período maior irá resultar em maiores valores de K_t . A conclusão inversa pode-se tirar do gráfico da Figura 3.13b, que com o aumento do D_{n50} diminui o K_t , se bem que de forma bastante ténue.

3.3.2 Coeficiente de transmissão por Jeffreys

A segunda fórmula analisada refere-se ao K_t desenvolvido por Jeffreys (1944), referido no *Shore Protection Manual* (Taveira-Pinto, 2001). Este para o seu desenvolvimento analisou o quebramar como se fosse uma barra submersa. Desta forma, para que a fórmula de Jeffreys seja válida, o quebramar deve ser submerso, largo e impermeável (Taveira-Pinto, 2001).

Esta, calcula o K_t mediante a profundidade total (p), a altura da obra (h_c), a largura de coroamento (B) e o período de onda (T).

$$K_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\left(\frac{0,25p}{p-h} \right)^{0,5} - \left(\frac{0,25p-0,25h}{p} \right)^{0,5} \right)^2 \times \text{sen}^2 \left(\left(\frac{2\pi B}{\sqrt{g}T} \left(\frac{1}{p-h} \right)^{0,5} \right) \right)}} \quad (3.9)$$

No desenvolvimento desta equação não foi considerada a dissipação de energia, desta forma a rebentação da agitação na estrutura ou a perda da energia por fricção não é contabilizada. Os parâmetros de validação neste caso estão relacionados com a profundidade a que se deseja implementar a obra, em que apenas é valida para águas pouco profundas, onde $p/gT^2 < 0.00155$. Também de ser respeitada a exigência de $h_c/p < 0.8$.

Tabela 3.5 - Valores para o cálculo do K_t por Jeffreys

B (m)	p (m)	T (s)	h (m)	h/p	p/gT ²	K _t
5	3	8	1	0,33	N.Conf.	-
			2	0,67	N.Conf.	-

Neste estudo em nenhuma das combinações efetuadas se para as características da estrutura se obtiveram resultados, já que em todas elas não era cumprida a penúltima coluna, representada na Tabela 3.5, que deveria ser menor a 0.00155. Como tal, não se torna possível a utilização da formula para o estudo.

3.3.3 Coeficiente por Allsop adaptado por Taveira-Pinto

Allsop utilizou quebramares de blocos rochosos de forma convencional, com múltiplas camadas e com altura relativa do coroamento, R_c/p entre 0.23 e 0.56, submetidos à ação de agitação irregular (Taveira-Pinto, 2001). Allsop, avaliou o K_t de quebramares submersos ($R_c < 0$) em função dos seguintes parâmetros: altura de onda significativa (H_s), da declividade aparente da onda (S_{op}) e a altura livre relativa acima da crista (R_c/H_s). Para a obtenção dos valores do K_t , surge inicialmente o coeficiente adimensional de transmissibilidade, R^* , dado

pela seguinte expressão (3.10).

$$R^* = \frac{|R_c|}{Hs} \sqrt{\frac{S_{op}}{2\pi}} \quad (3.10)$$

Depois de ser feita a análise ao R^* deve ser feita uma proporção para se obter o K_t . Para tal Taveira-Pinto (2001) desenvolveu o gráfico presente na Figura 3.14, que relaciona o R^* com o K_t , fazendo linhas de tendência dos resultados que dispunha, obtendo desta forma equações de curvas, onde nestas o Y corresponde ao K_t e o X ao R^* .

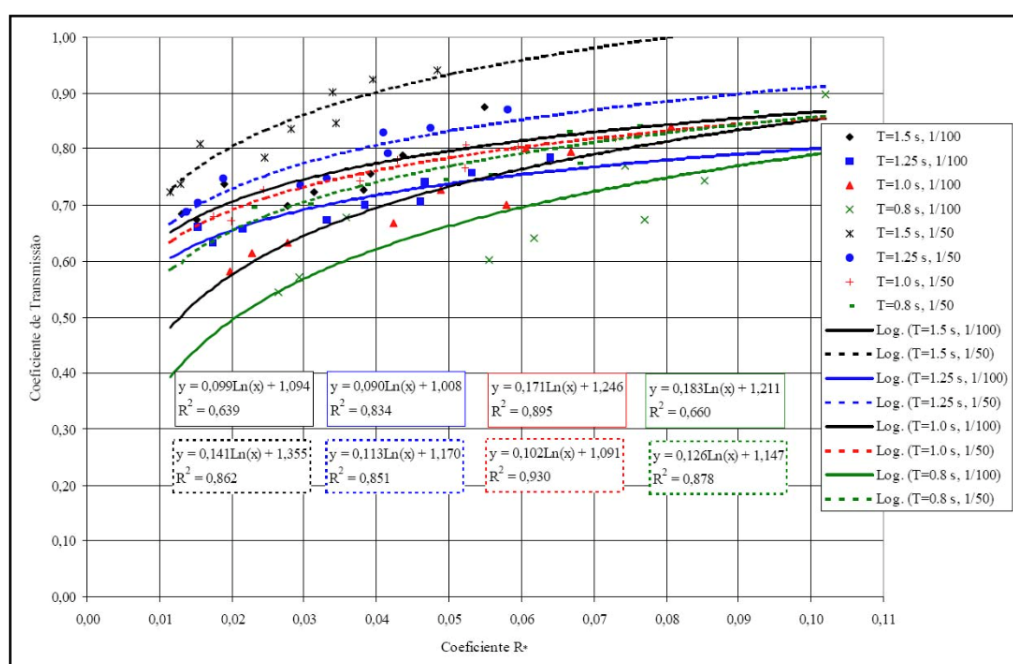


Figura 3.14 - Linhas de tendência que relacionam o R^* com o K_t (Taveira-Pinto, 2001)

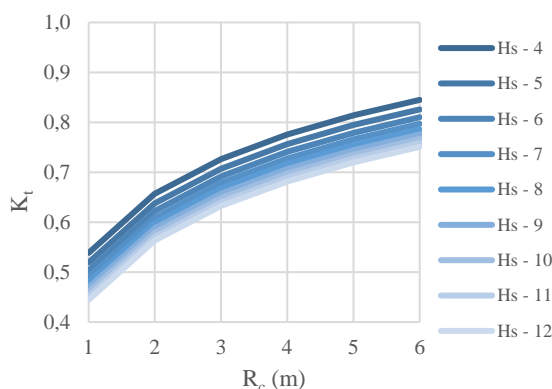
$$K_t = 0,171\ln(R^*) + 1,246 \quad (3.11)$$

A correlação utilizada foi anteriormente apresentada (equação 3.11), já com as corretas variáveis. Já as variáveis que se alteraram no estudo da equação R^* variam dentro da mesma gama de valores. A Tabela 3.7 é mais uma vez, um excerto da estrutura dos valores gerados, onde nela apenas se variou o R_c , até menos um metro que a profundida testada (7m neste caso).

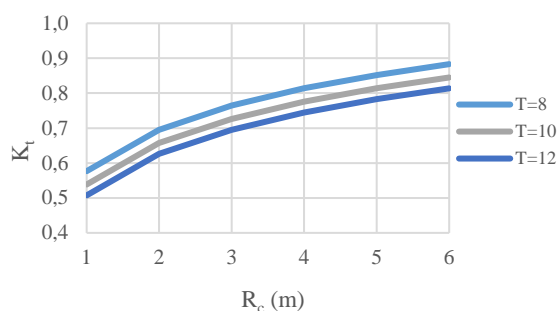
Tabela 3.6 - Valores de R^* e K_t com a alteração do R_c ($H_s=4m$, $T=10s$ e $d=410m$)

R_c (m)	S_{op}	R^*	K_t
1	0,03	0,016	0,538
2	0,03	0,032	0,657
3	0,03	0,048	0,726
4	0,03	0,064	0,776
5	0,03	0,080	0,814
6	0,03	0,096	0,845

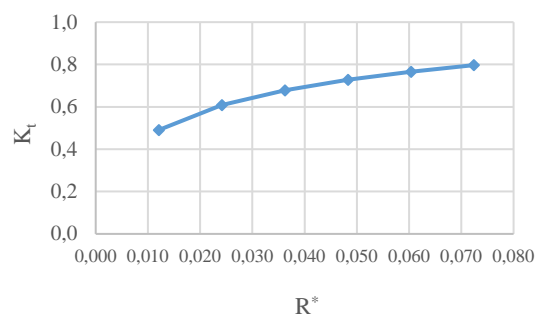
Já os resultados relativos aos restantes parâmetros que sofreram alteração, H_s (4 a 12m), T (8, 10 e 12s) e p (3, 5 e 7m), apresentam-se em formato de gráficos na Figura 3.15.



a) Curva da variação da altura de onda ($T=10s$)



b) Variação do período ($H_s=4m$)



c) Relação R^* e K_t ($H_s=7m$ e $T=10s$)

Figura 3.15 – Análise de sensibilidade das variáveis do cálculo do K_t

Com a observação dos gráficos acima representados é possível ter noção do comportamento de cada parâmetro. Na Figura 3.15a apresenta-se o gráfico que relaciona o K_t com o aumento da profundidade da cota de coroamento (R_c medido abaixo do N.M.M.) para as diferentes ondas incidentes. Esta pretende evidenciar o comportamento de cada altura de onda

incidente para as diferentes cotas de R_c , onde com o aumento da profundidade deste, aumenta o K_t relacionado. A imagem *b* evidencia o comportamento, dentro da mesma cota de coroamento, das diferentes alturas de onda incidente, onde se revela uma diminuição de K_t com o aumento da altura de onda. Também se pode concluir, que para a mesma relação R_c e K_t , com o aumento do período existe uma diminuição do K_t .

3.3.4 Coeficiente de transmissão por Goda *et al.*

A equação para determinar o K_t desenvolvida por Goda *et al.* (1967) é uma equação resultante de um estudo empírico. Desta forma, na sua constituição tem parâmetro empíricos que a torna menos extensa no que toca a resultados obtidos, já que a sua manipulação está mais limitada. Goda *et al.* (1967), para este cálculo, incluíram na mesma equação a cota de coroamento (R_c), a altura de onda incidente (H_s) e dois parâmetros de proveniência empírica, o v e o α (Tabela 3.7).

$$K_t = 0,5 \left(1 - \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{R_c}{H_s} + v \right) \right) \right) \quad (3.12)$$

Tabela 3.7 – Parâmetros de transmissão segundo Goda *et al.* (1967)

Caso	α	v
Vertical	1,80	0,10
Caixão	2,20	0,40
2/3 (V/H)	2,60	0,15

Neste caso apenas foi testada a inclinação sobre a qual existia acesso de dados de coeficientes, quebramar com taludes iguais com uma inclinação de 2/3 (V/H). Na Tabela 3.8 está um excerto da estrutura de calculo, referente a uma onda com 4m, e na Figura 3.16 a análise de sensibilidade obtida.

Tabela 3.8 - Valores para o cálculo do K_t por Goda *et al.* (1967) ($V/H=2/3$, $v = 0.15$, $\alpha=2.6$ e $H_s=4m$)

R_c (m)	R_c/H_s	K_t
1	0,25	0,530
2	0,50	0,605
3	0,75	0,677
4	1,00	0,746
5	1,25	0,808
6	1,50	0,864

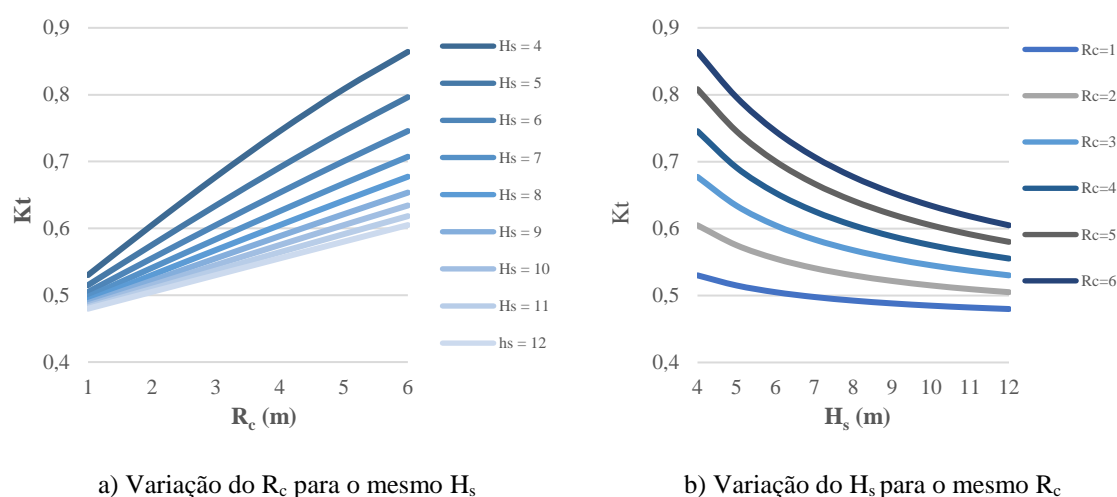


Figura 3.16 – Análise de sensibilidade das variáveis para cálculo do K_t

3.3.5 Coeficiente de transmissão por d'Angremond *et al.* adaptado por Van der Meer *et al.*

d'Angremond *et al.* (1996) desenvolveram uma fórmula para o coeficiente de transmissão baseada nas relações R_c/H_s , B/H_s e no parâmetro de rebentação ξ_{op} da onda, para taludes que se assumam como permeáveis. Do desenvolvimento desta formulação, surgem as Equações 4.13 e 4.14, resultantes da correção feita por Van der Meer *et al.* (2005) ao trabalho inicialmente desenvolvido por d'Angremond *et al.* (1996). O K_t final depende da proporção B/H_s , que se for menor que 10, obtém-se a partir da equação 3.12, e da 3.13 se for superior a este valor.

$$K_t = -0,4 \frac{R_c}{H_s} + 0,6 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0,31} (1 - e^{-0,5\xi_{op}}), \quad \frac{B}{H_s} < 10 \quad (3.13)$$

$$K_t = -0,35 \frac{R_c}{H_s} + 0,51 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0,65} (1 - e^{-0,41\xi_{op}}), \quad \frac{B}{H_s} > 10 \quad (3.14)$$

Os limites para os quais a fórmula apresenta valores de K_t dentro do seu limite, são entre 0.05 e um limite superior variável, K_{tu} , que pode ser obtido segundo a Equação 3.15.

$$K_{tu} = -0,006 \frac{B}{H_s} + 0,93 \quad (3.15)$$

Os parâmetros R_c , B e H_s variaram dentro dos valores praticados anteriormente. Os parâmetros T e β entram indiretamente na equação devido ao ξ_{op} . Apresenta-se na Tabela 3.9 a estrutura adotada no cálculo do K_t por Van der Meer *et al.* (2005), e na Figura 3.17 os gráficos correspondentes.

Tabela 3.9 – Valores para calculo do K_t por Van der Meer *et al.* (2005) ($V/H=2/3$, $B=5m$, $H_s=4m$ e $K_{tu}=0.92$)

R_c (m)	ξ_{op}	T (s)	L_s (m)	K_t
1	1,66	8	99,9	0,438
	2,08	10	156,1	0,486
	2,50	12	224,8	0,526
2	1,66	8	99,9	0,538
	2,08	10	156,1	0,586
	2,50	12	224,8	0,626
3	1,66	8	99,9	0,638
	2,08	10	156,1	0,686
	2,50	12	224,8	0,726
4	1,66	8	99,9	0,738
	2,08	10	156,1	0,786
	2,50	12	224,8	0,826
5	1,66	8	99,9	0,838
	2,08	10	156,1	0,886
	2,50	12	224,8	0,926
6	1,66	8	99,9	0,938
	2,08	10	156,1	0,986
	2,50	12	224,8	1,000

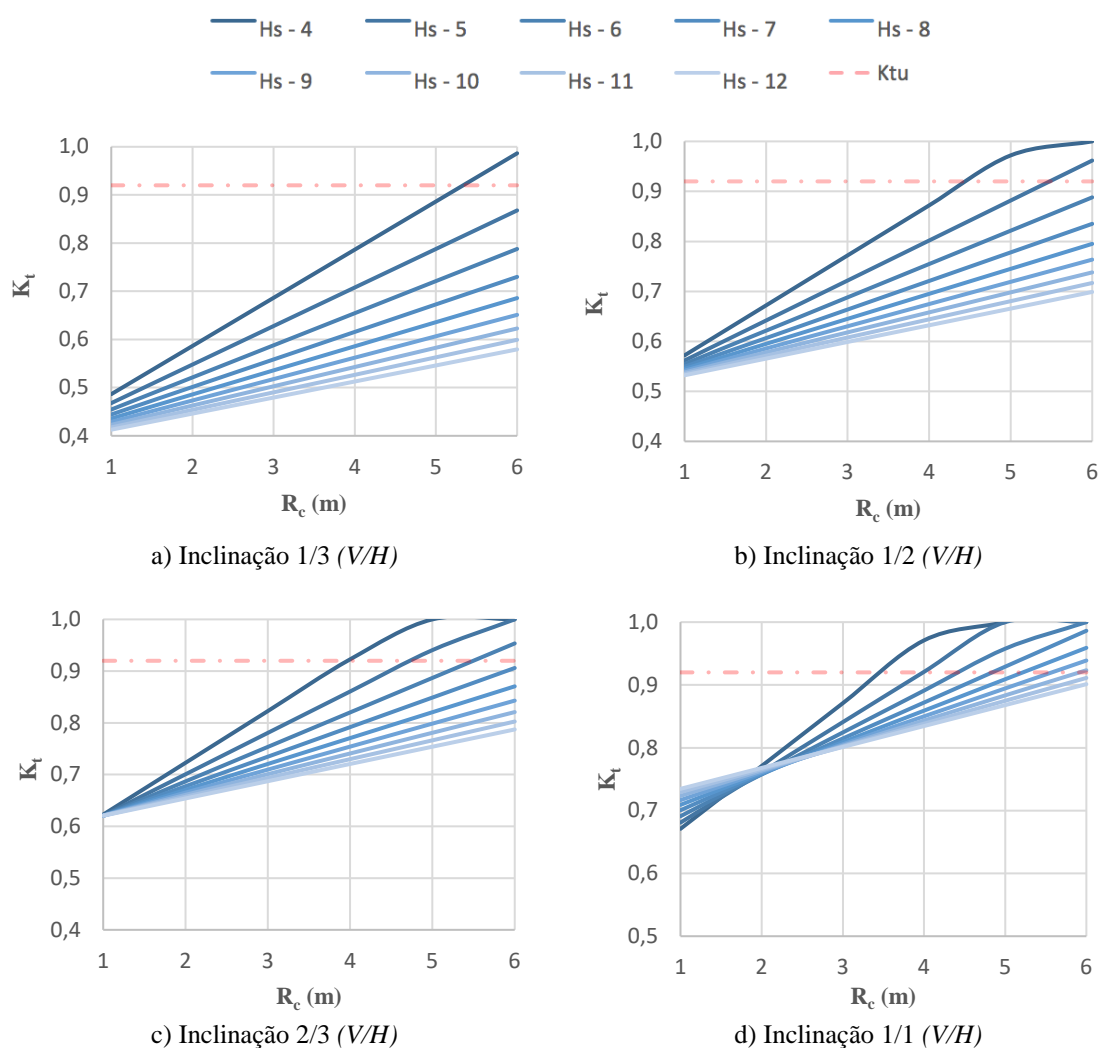


Figura 3.17 – Relação entre o K_t com o aumento da profundidade do R_c por inclinação para as sucessivas alturas de onda (m)

A linha vermelha traçada nos gráficos da Figura 3.17 representa o limite máximo K_{tu} , e como o valor obtido varia na ordem das milésimas para cada B/H_s analisado, assumiu-se o valor genérico de 0.92. Numa breve análise aos resultados, entende-se que com o aumento da inclinação dos taludes do quebramar se acentua o comportamento de K_t obtido por R_c para as H_s . Por consequente, o limite K_{tu} é atingido mais cedo com este aumento, ou seja, para menores valores de R_c . Na Figura 3.18 apresentam-se gráficos que relacionam diretamente as diferentes larguras de coroamento e inclinações analisadas.

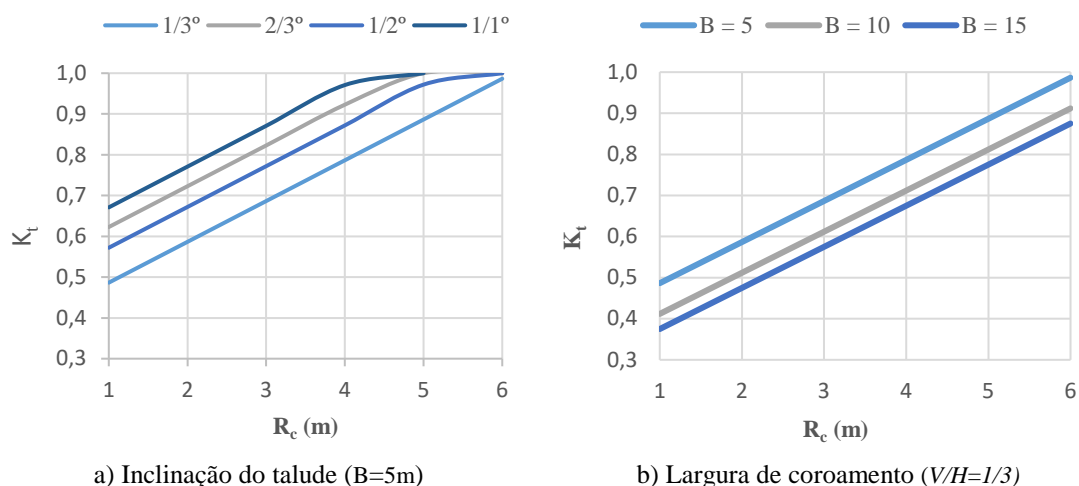


Figura 3.18 – Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$, $T=10s$, $H_s=4m$)

Destes gráficos é possível ter a sensibilidade de que com o aumento da inclinação dos taludes o K_t vai aumentando, existindo sempre um paralelismo de comportamento entre inclinações, já que a comparação é feita para a mesma altura de onda incidente, 4m. Com o aumento das inclinações também se faz sentir menos a diferença entre o comportamento demonstrado de cada uma delas. Quanto à largura de coroamento, é um parâmetro que revela comportamento inverso ao da inclinação, ou seja, com o aumento dos seus valores diminui o K_t associado. Esta diminuição revela-se superior entre 5 m e 10m, com uma diferença de 0.074. Já entre o B de 10m e o de 15m a diferença registada foi de 0.037, representando metade da anterior.

3.3.6 Coeficiente de transmissão por Buccino & Calabrese

Buccino & Calabrese (2007), utilizando as bases de dados resultantes dos trabalhos de Daemen (1991) e d'Angremond *et al.* (1996), obtiveram uma nova expressão para o cálculo de K_t . Nesta investigação, os quebramares foram divididos em dois grupos: quebramares destacados submersos ou recifes artificiais, e quebramares com o coroamento acima do N.M.M. Os casos onde o nível de coroamento do quebramar é idêntico ao nível médio das águas do mar servem como limite entre as duas situações. A expressão de Buccino & Calabrese (2007) utilizada no caso de estudo apresenta-se na equação 3.16, associada ao cálculo do K_t para estruturas submersas.

$$K_t = \frac{1}{1,18\left(\frac{H_s}{|R_c|}\right)^{0,12} + 0,33\left(\frac{H_s}{|R_c|}\right)^{1,5} \frac{B}{\sqrt{H_s L}}}; \quad \frac{1}{0,5} \geq \frac{|R_c|}{H_s} \geq \frac{1}{1,2} \quad (3.16)$$

Buccino e Calabrese (2007) equacionam o K_t segundo a proporção H_s/R_c e $B/\sqrt{H_s L}$, mas o limite da mesma estabelece-se a partir da relação $|R_c|/H_s$ apresentadas na Equação 3.16. As proporções menores que 1/1.2 calculam-se através de interpolação. A Tabela 3.10 representa a estrutura adaptada para o cálculo efetuado no presente subcapítulo.

Tabela 3.10 - Valores para o cálculo do K_t por Buccino e Calabrese ($V/H=1/3$, $H_s=4m$ e $B=5m$)

R_c (m)	H_s/R_c	ξ_{op}	T (s)	L_s (m)	R_c/H_s	K_t
1	4,00	1,66	8	99,92	0,25	0,487
		2,08	10	156,13	0,25	0,520
		2,50	12	224,83	0,25	0,545
2	2,00	1,66	8	99,92	0,50	0,660
		2,08	10	156,13	0,50	0,681
		2,50	12	224,83	0,50	0,695
3	1,33	1,66	8	99,92	0,75	0,742
		2,08	10	156,13	0,75	0,756
		2,50	12	224,83	0,75	0,766
4	1,00	1,66	8	99,92	1,00	0,792
		2,08	10	156,13	1,00	0,803
		2,50	12	224,83	1,00	0,810
5	0,80	1,66	8	99,92	1,25	0,828
		2,08	10	156,13	1,25	0,836
		2,50	12	224,83	1,25	0,842
6	0,67	1,66	8	99,92	1,50	0,856
		2,08	10	156,13	1,50	0,862
		2,50	12	224,83	1,50	0,867

Seguem-se os gráficos relativos aos valores genéricos da análise efetuada, com o estudo dos parâmetros relevantes, apresentados na Figura 3.19.

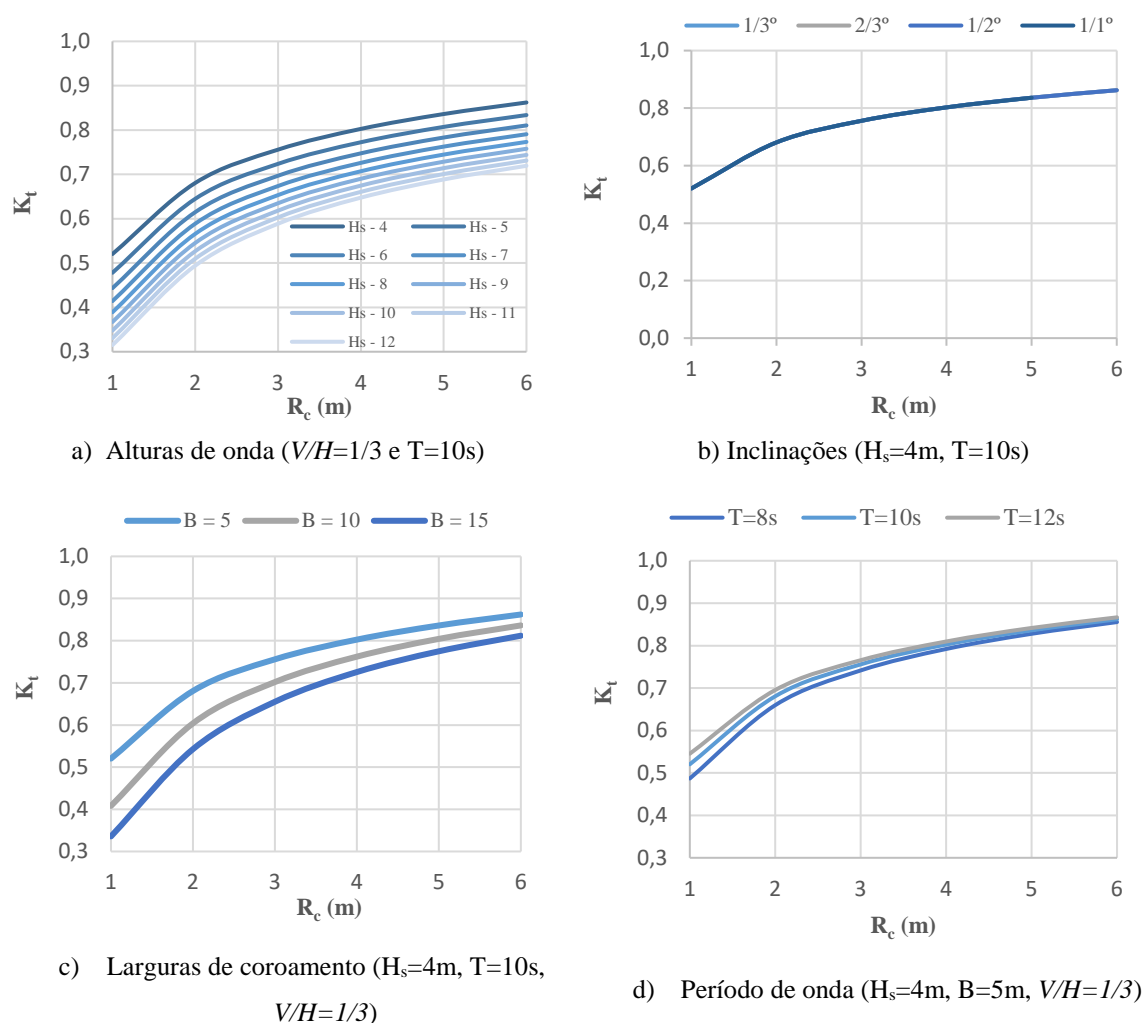


Figura 3.19 - Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$)

Dos gráficos apresentados entende-se o comportamento dos parâmetros analisados presentes na fórmula de Buccino & Calabrese (2007) (Figura 3.19a), com uma mudança de comportamento entre o $R_c=2$ e o $R_c=3$, mantendo antes e depois uma tendência de evolução perto do linear. Na Figura 3.19b, onde se comparam os valores de K_t obtidos nas inclinações analisadas, constata-se que este parâmetro não tem interferência na resposta estudada. Já o gráfico da largura de coroamento (B), Figura 3.19c, apresenta diferentes respostas com o aumento deste parâmetro, onde para valores superiores de B diminui o K_t , sendo que esta diminuição se mostra menor com o aumento do R_c . Por último, observa-se que o T (Figura 3.19d) afeta ligeiramente os valores obtidos no K_t para menores distâncias de R_c , já que para valores superiores deste parâmetro a resposta é praticamente coincidente.

3.3.7 Coeficiente de transmissão por Ahrens

Ahrens (2001), por sua vez, sugere uma análise da transmissão segundo os modos dominantes da transmissão da agitação incidente em função da altura do coroamento em relação ao N.M.M., R_c , fazendo proporção com a altura de onda incidente em águas profundas, H_{so} . Se a estrutura for submersa, $R_c/H_s < 0$, o modo de transmissão da agitação ocorre maioritariamente mediante o galgamento *sobre* o coroamento da estrutura (Equação 3.19). Pelo contrário, se a estrutura tiver o coroamento acima do N.M.M., com $0 < R_c/H_s < 2$, a transmissão da agitação ocorre *através* (Equação 3.18) do quebramar e *sobre* o coroamento. Numa estrutura dimensionada para não ser galgada, com $R_c/H_s > 2$, a agitação é, predominantemente, transmitida *através* da estrutura. À exceção das estruturas submersas, o cálculo do K_t (Equação 3.17) está associado a uma expressão que combinada os K_t parciais, $(K_t)_{através}$ e $(K_t)_{sobre}$, obtido pela Equação 3.21 e 3.22, respetivamente. As Equações 3.18 e 3.19 representam coeficientes auxiliares, $f_{através}$ e f_{sobre} , necessários para o cálculo do K_t geral.

Admitindo, então, que o coroamento de uma estrutura submersa não se prolonga até à superfície, não faria sentido avaliar a transmissão da agitação como se de um quebramar emerso se tratasse, razão pela qual o autor apresenta uma equação obtida por regressão para o coeficiente f_{sobre}^* de um quebramar submerso, Equação (3.20) (Ahrens, 2001; Pereira, 2008). Os parâmetros intervenientes na avaliação do coeficiente de transmissão para além do R_c e H_s nesta formulação são também o comprimento de onda em grandes profundidades, L (associado ao período como anteriormente visto), o diâmetro nominal do enrocamento, D_{n50} (1.019 e 1.147m), a altura total do quebramar destacado, h_c (1 a 6m), e a área total da secção transversal do mesmo, A_t , onde surgem indiretamente os parâmetros físicos B (5, 10 15m) e V/H (1/3, 1/2, 2/3 e 1/1).

$$K_t = \sqrt{(K_t)_{sobre} + (K_t)_{através}} \quad (3.17)$$

$$f_{através} = \frac{H_s^{0,982}}{D_{n50}} e^{0,433 + 2,35 \frac{A_t}{L h_c}} \quad (3.18)$$

$$f_{sobre} = e^{0,465 + 12,7 \frac{R_c}{\sqrt{H_s L}} - \frac{17,4}{D_{n50} h_c} \frac{A_t}{L} + \frac{0,00118}{L} H_s} \quad (3.19)$$

$$f_{sobre}^* = e^{-0,646 + 0,631 \frac{R_c}{H_s} + 0,00137 \frac{A_t}{D_{n50}^2}} \quad (3.20)$$

$$(K_t)_{através} = \frac{1}{(1 + f_{através})} \quad (3.21)$$

$$(K_t)_{sobre} = \frac{1}{(1 + f_{sobre})} \quad (3.22)$$

Mediante a aplicação das Equações 3.20 e 3.22 efetuou-se o cálculo do K_t segundo este autor, visto serem as expressões que se aplicam no caso em estudo (quebramares destacados submersos). A Tabela 3.11 ilustra a estrutura de cálculo adotada nesta formulação.

Tabela 3.11 – Valores para o cálculo do K_t por Ahrens ($D_{n50}=1.019$, $H_s=4m$, $d=410m$, $B=5m$)

R_c (m)	h_c (m)	R_c/H_s	B_{inf}	A_t (m ²)	f_{sobre}^*	K_t
1	6	-0,25	13,0	54,0	0,48	0,675
2	5	-0,50	11,7	41,7	0,40	0,712
3	4	-0,75	10,3	30,7	0,34	0,746
4	3	-1,00	9,0	21,0	0,29	0,777
5	2	-1,25	7,7	12,7	0,24	0,805
6	1	-1,50	6,3	5,7	0,20	0,830

Na Figura 3.20 apresentam-se os gráficos da análise de sensibilidade dos parâmetros variáveis nas equações avançadas por Ahrens (2001).

Na análise de sensibilidade realizada aos resultados da formulação em questão observa-se que os parâmetros intervenientes no cálculo do K_t têm diferentes importâncias dentro daquilo que é a dinâmica da formula. Aqueles que afetam de forma mais notória o K_t com a sua variação são o parâmetro físico R_c e o referente à onda H_s .

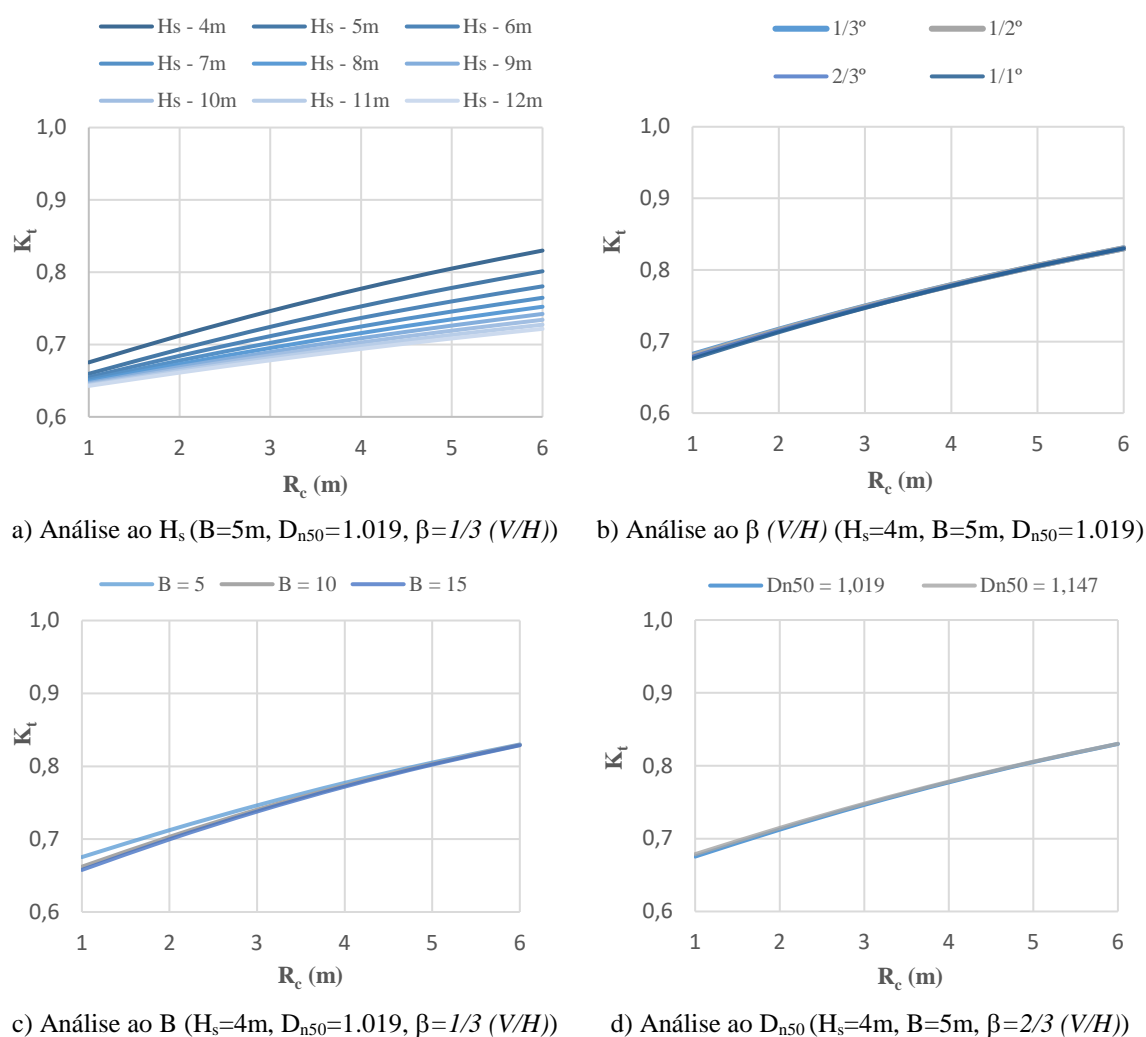


Figura 3.20 - Análise de sensibilidade às características físicas alteráveis na obtenção do K_t com o aumento do R_c ($d=410m$)

Da Figura 3.20a retira-se que para maiores alturas de onda o K_t diminui para o mesmo R_c . Por outro lado, com o aumento deste parâmetro, o K_t aumenta de forma linear, verificando-se um menor aumento para maiores valores de H_s . Os parâmetros B , D_{n50} e β não revelam o mesmo peso na dinâmica da fórmula, com variações de resultados bastante pequenos, não assumindo, contudo, os mesmos valores. Dentro destes, o B é o que revela maior variação de resultados, para os primeiros valores de R_c analisados, Figura 3.20c.

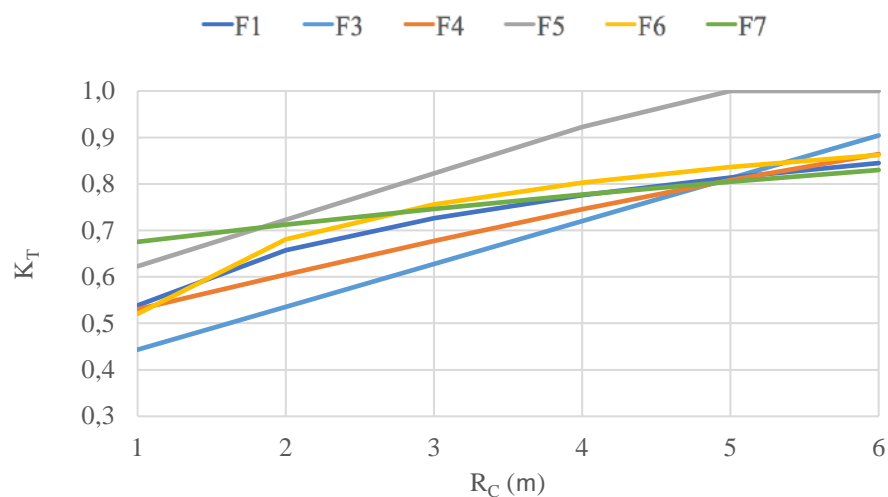
3.3.8 Comparação dos resultados obtidos pelos diferentes autores

Cada uma das fórmulas anteriormente analisadas permitiu ter noção da importância de cada parâmetro, no cálculo do K_t . Ao manipular um número considerável de fórmulas que permitem todas calcular o mesmo coeficiente é possível ter percepção de qual o comportamento mais previsível associado à variação de cada fator interveniente. Para além disso, ganha-se um contexto superior de comparação (Figura 3.21), onde se clarifica quais fórmulas são mais ou menos conservativas.

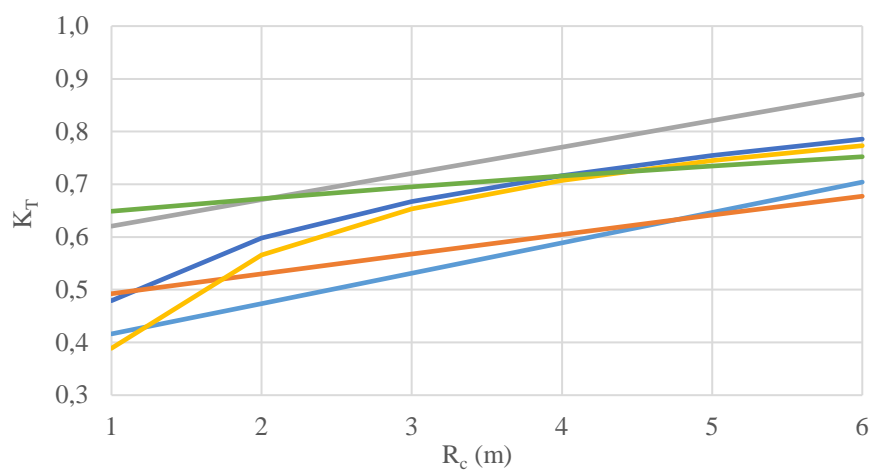
Na Figura 3.21 apresentam-se 3 dos 9 gráficos possíveis (por variação da altura de onda), apresentado a comparação do K_t obtido seguindo as fórmulas dos diferentes autores anteriormente referidos. Nestes, fazem-se então as comparações dos valores obtidos de K_t para alturas de onda incidentes de 4, 8 e 11m, analisando assim evolução das respostas obtidas com o aumento da altura de onda, H_s . Na legenda, as fórmulas aparecem com a nomenclatura $F1$, $F3$, $F4$, $F5$, $F6$ e $F7$, correspondendo a numeração à sequência de apresentação dos autores, ou seja, propostas por Van der Meer e Daemen (1994), Allsop (adaptado por Taveira-Pinto, 2001), Goda *et al.* (1967), d'Angremond *et al.* (adaptado por Van de Meer, 2005), Buccino e Calabrese (2007) e Ahrens (2001), respetivamente.

Verificam-se dois comportamentos genéricos distintos. Dentro do mesmo H_s , existem fórmulas que se comportam de forma quase linear, com um aumento proporcional entre cada variação de R_c ($F3$, $F4$, $F5$ e $F7$), e aquelas que aumentam menos o K_t para valores superiores de R_c ($F1$ e $F6$). Verifica-se também que para as alturas de onda superiores a tendência é existir um maior paralelismo entre equações, ou seja, quando maior for o H_s menor tendência existe para a variação de K_t com o aumento do R_c .

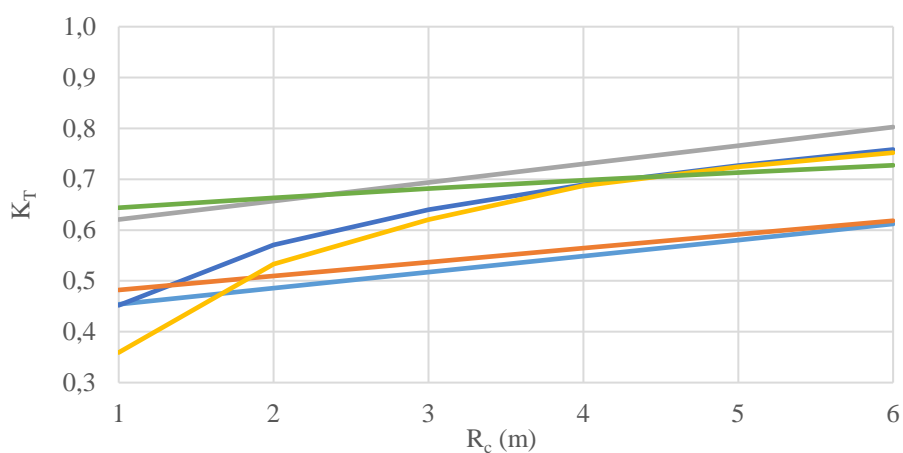
Existe também uma grande diferença para os resultados obtidos entre fórmulas com o mesmo tipo de parâmetros iniciais, com uma variação, verificada para o caso extremo no gráfico da Figura 3.21a, de aproximadamente 0.15 no valor final do K_t . Assim percebe-se a importância do confronto de resultados referentes às diferentes formulações de coeficientes de transmissão.



a) $H_s = 4\text{m}$



b) $H_s = 8\text{m}$



c) $H_s = 11\text{m}$

Figura 3.21 – Comparação dos valores obtidos do K_t pelos diferentes autores por H_s (m) ($T=10\text{s}$, $B=5\text{m}$, $V/H=2/3$, $d=410\text{m}$)

Optou-se então pela equação *F4*, a laranja na Figura 3.21, que pertence à proposta de coeficiente de transmissão de Goda *et al.* (1967). A escolha recaiu sobre *F4* porque é das que tem um comportamento menos conservativo, com um impacto superior na onda para as mesmas características físicas analisadas, assumindo valores de coeficiente de transmissão entre os 0.47 e os 0.87, dependendo das características analisadas.

3.3.9 Cálculo do espraçamento

Após ser determinado o K_t associado a cada alteração dos parâmetros analisados, que permite estimar a altura de onda que ultrapassa o quebramar destacado, é possível calcular o espraçamento que essa onda transmitida irá proporcionar (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 –Espraçamento na praia associado à onda transmitida pelo ao quebramar destacado, para $H_s=4m$

R_c (m)	K_t	H_{st} (m)	T (s)	L_s (m)	ξ_{op}	$R_{m\acute{a}x}$ (m)	ΔH (m)
1	0,530	2,12	8	99,9	0,549	3,37	-
			10	156,1	0,686	4,22	-
			12	224,8	0,823	5,06	0,1
2	0,605	2,42	8	99,9	0,514	3,60	-
			10	156,1	0,642	4,51	-
			12	224,8	0,770	5,41	0,4
3	0,677	2,71	8	99,9	0,485	3,81	-
			10	156,1	0,607	4,77	-
			12	224,8	0,728	5,72	0,7
4	0,746	2,98	8	99,9	0,463	4,00	-
			10	156,1	0,578	5,00	0,0
			12	224,8	0,694	6,00	1,0
5	0,808	3,23	8	99,9	0,444	4,17	-
			10	156,1	0,555	5,21	0,2
			12	224,8	0,667	6,25	1,2
6	0,864	3,46	8	99,9	0,430	4,31	-
			10	156,1	0,537	5,38	0,4
			12	224,8	0,645	6,46	1,5

Considerando os cenários de agitação em estudo e assumindo as características da agitação a sotamar do quebramar, calculou-se o espraioamento sobre o perfil da praia sem obra, utilizando assim a Equação 3.2, referente ao espraioamento estimado para uma praia natural. No estudo dos cenários avaliados foi assumido que o período de onda associado à onda transmitida se mantém igual ao da onda incidente e não é alterado pela estrutura. As análises deste parâmetro avaliaram-se a uma profundidade de 7m, já que é aquela onde é possível comparar avaliar mais valores de cotas de coroamento. Seguem-se os gráficos, presentes na Figura 3.22, que relacionam o espraioamento máximos esperado ($R_{\text{máx}}$) e a altura de onda incidente por profundidade de coroamento do quebramar destacado, ilustrando o comportamento dos resultados obtidos.

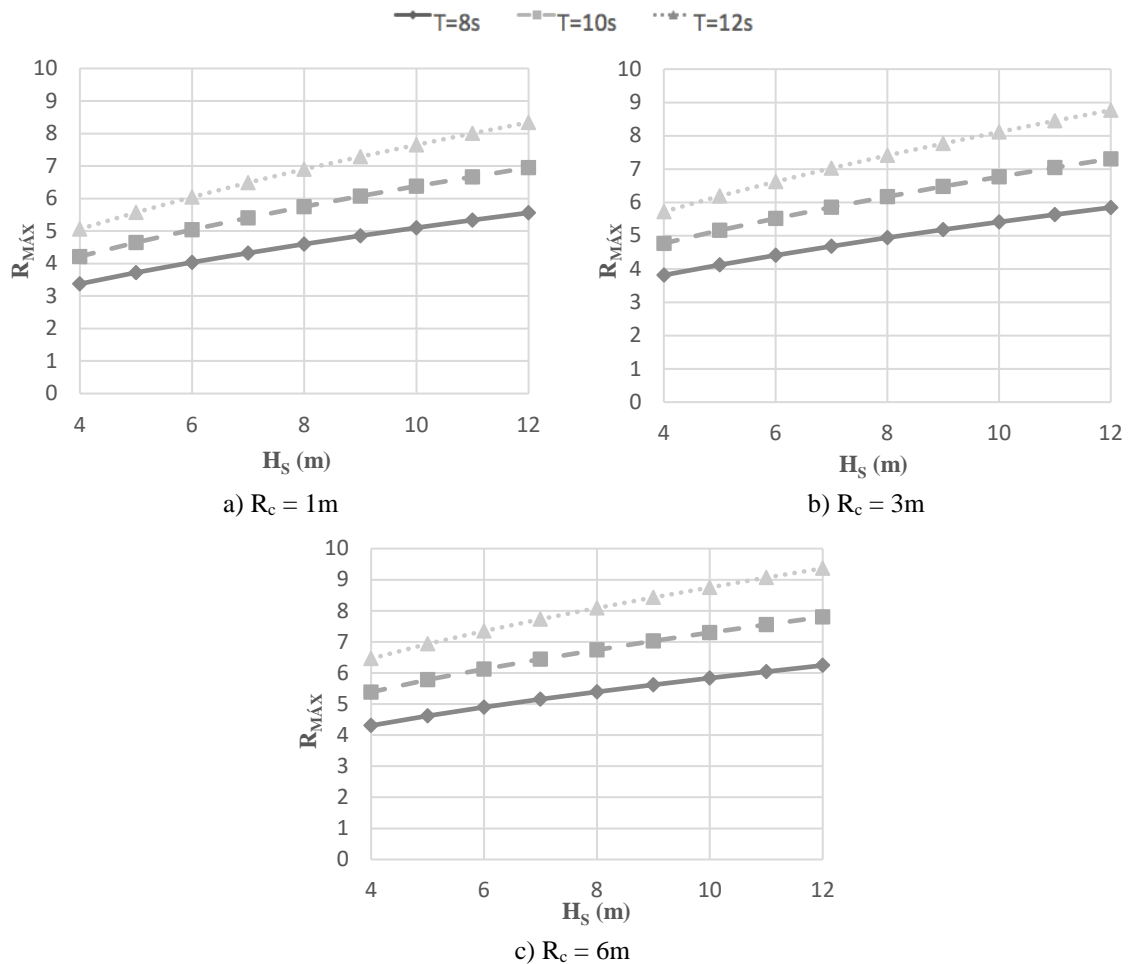


Figura 3.22 –Espraioamento sobre a praia natural após passagem sobre o quebramar destacado com diferentes R_c em função de H_s

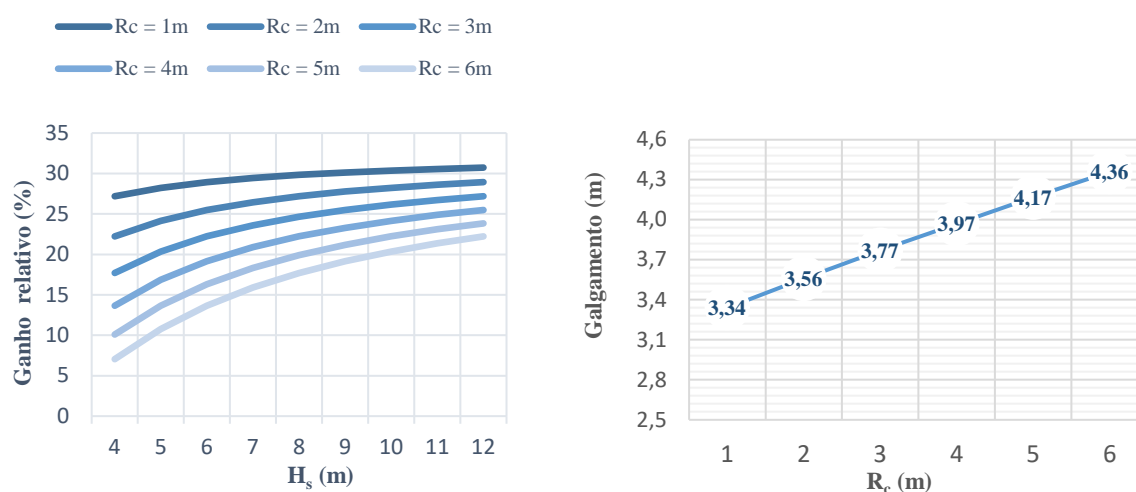
Com a presença do quebramar destacado submerso não foram totalmente mitigados os galgamentos, pois em todos os cenários analisados registam-se a partir de uma certa altura de onda. Os galgamentos também são afetados em função do período associado às ondas, onde quanto menor for o período menor é o espraçamento. Entenda-se que, para um $H_s=4\text{m}$, um quebramar com um $R_c=5\text{m}$, ou seja uma obra com 2m de altura, chega para restringir completamente os galgamentos, se o período associado for de 8s. Já se se alterar apenas o período para 10s, mantendo as restantes considerações, já é necessária uma obra com 3m de altura para passar a não existir galgamentos.

Com o consecutivo aumento da profundidade de coroamento, o espraçamento na praia aumenta, já que o K_t aumenta e, portanto, existe um aumento da altura de onda transmitida. Se se analisar para o mesmo R_c , com a profundidade de 1m, a diferença no espraçamento quando se aumenta a altura de onda de 4 para 5m é de 0.43m, o que representa um aumento de 10% de altura de espraçamento. Para as mesmas alturas de onda incidentes, mas com um R_c de 3m, a diferença obtida é de 0.39m, o que representa um aumento de 8%, ou seja, o aumento de onda faz-se sentir menos para quebramares mais pequenos. Por outro lado, e ainda considerando os mesmos dois exemplos, a diminuição da altura da estrutura em dois metros está associada a um aumento de 0.55m no espraçamento máximo, o que indica uma perda de rendimento de 13%. Contudo, a tendência do aumento do espraçamento com a diminuição da altura da estrutura é menor para circunstâncias em que a onda incidente é superior. Por exemplo, entre as cotas anteriormente referidas ($R_c=1$ e 3m), para valores de H_s entre 8 e 9m, o aumento do espraçamento obtido para a estrutura com 6m é de 0.327m, e para a estrutura com 4m é de 0.302m, que representam um aumento no espraçamento de 5.6% e 4.9% (respetivamente). A diferença entre estas soluções apresenta assim uma perda na eficácia de redução do espraçamento de 7.6% com a diminuição da estrutura, sendo inferior aos 13%, da situação descrita anteriormente.

3.3.10 Discussão de resultados

O quebramar destacado submerso deixa de mitigar galgamentos a partir de um H_s com 9m. Para o período médio analisado de 10s, a maior estrutura consegue conter galgamentos até um H_s de 6m. Apresentam-se, na Figura 3.23, gráficos representativos do ganho de cada cota de coroamento, em relação ao cenário de referência, com o aumento do H_s (Figura 3.23a) e

os galgamentos máximos obtidos na circunstância mais desfavorável ($H_s=12\text{m}$, $T=12\text{s}$), para cada R_c (Figura 3.23b).



a) Redução (%) do espraçamento entre a situação com e sem quebramar

b) Altura de galgamentos máximos ($H_s=12\text{m}$, $T=12\text{s}$)

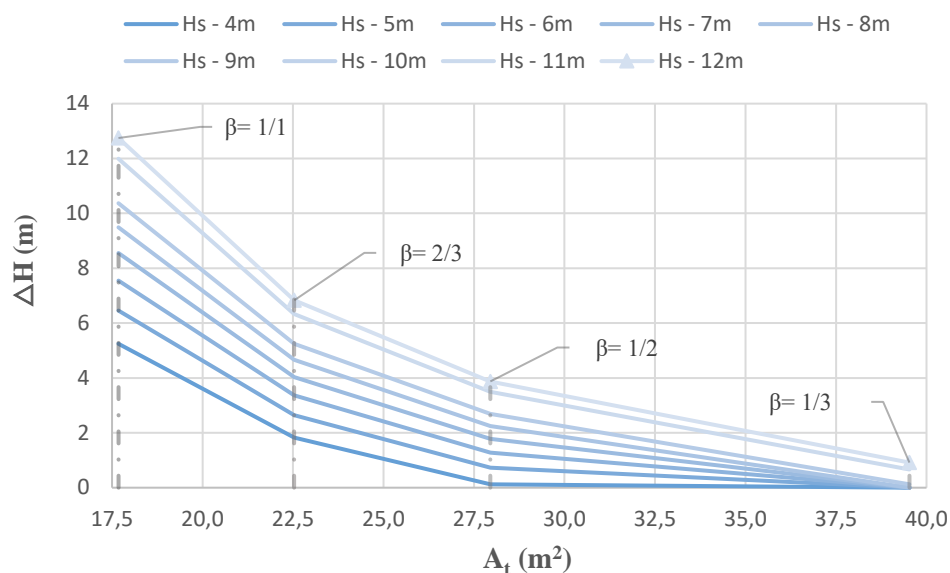
Figura 3.23 – Quebramares submersos com diferentes cotas de coroamento

Para os cenários de agitação mais desfavoráveis, ($H_s=12\text{m}$, $T=12\text{s}$), verifica-se que os galgamentos obtidos evoluem de forma praticamente linear com o aumento do R_c , assumindo valores entre os 3.3m e os 4.3m galgados (Figura 3.23b). Num plano geral verifica-se que, a maior eficácia e o maior ganho percentual pertencem a cotas de coroamento superiores, que correspondem a maiores alturas de estruturas, como também a maiores gastos de material. Analisando o comportamento individual de cada R_c com o aumento do H_s (Figura 3.23a) verifica-se uma maior diferença de comportamento da estrutura para R_c 's maiores, pelo que com obras de cota mais alta se mantêm mais constante para todos os H_s 's analisados. Como anteriormente referido, o ganho em relação à praia natural é superior para ondas de maior altura (para ondas superiores a 10m o ganho encontra-se entre os 20 e 35%, dependendo do R_c). Nas alturas de onda mais pequenas (de 4 a 6m) entende-se que o R_c afeta mais a resposta obtida.

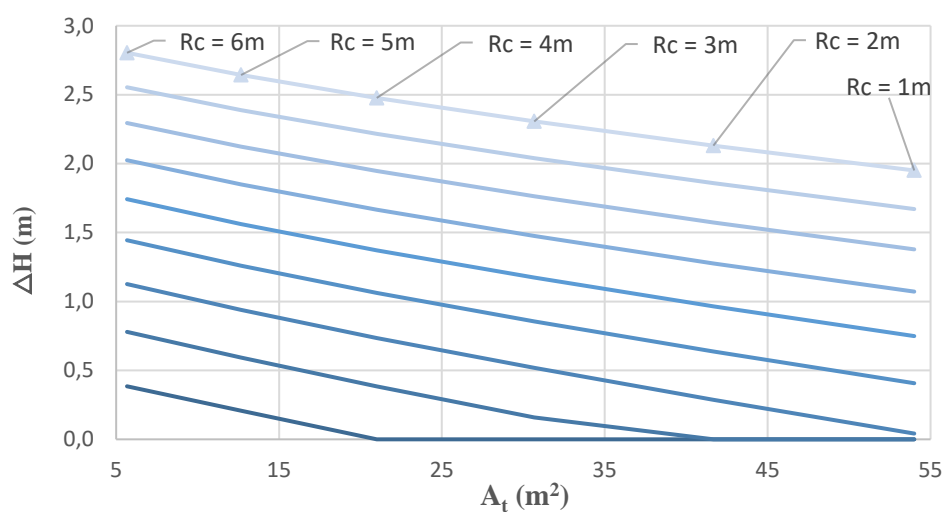
3.4 Comparação de Soluções

Depois das análises de sensibilidade realizadas para cada parâmetro das obras longitudinais aderentes e dos quebramares destacados submersos, analisaram-se os resultados. Desta

forma, relacionou-se a altura galgada associada a cada estrutura com a área transversal que a obra representa. Obtiveram-se os gráficos presentes na Figura 3.24.



a) Obra longitudinal aderente

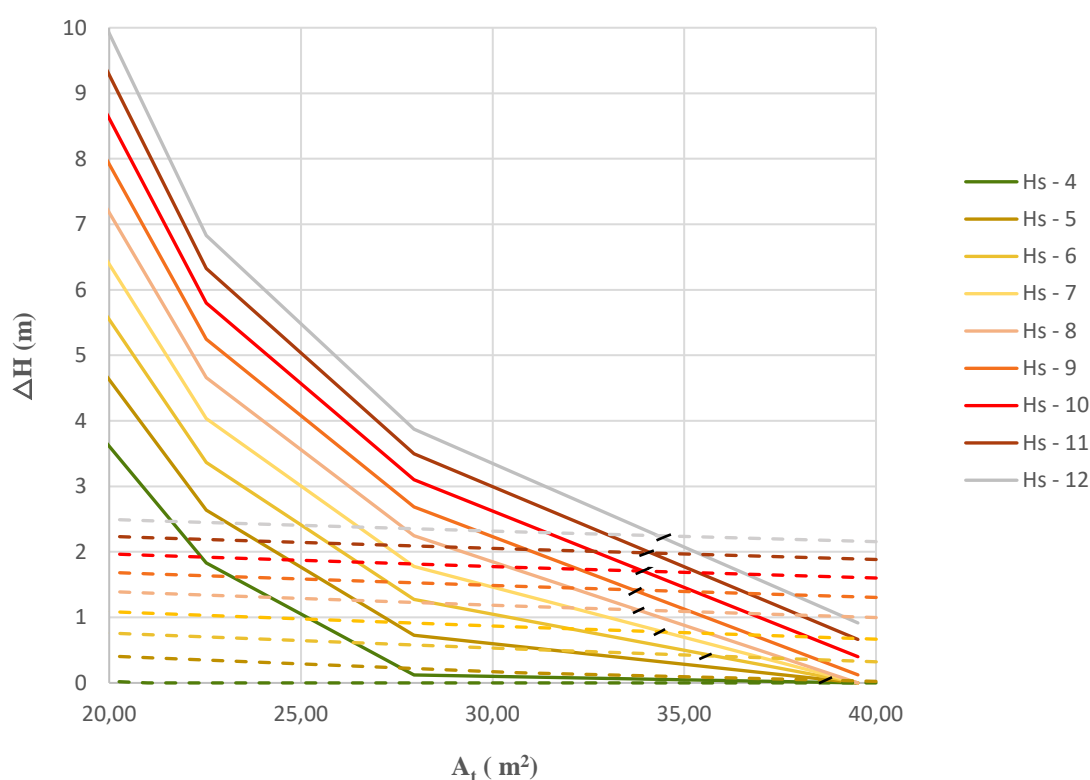


b) Quebramar destacado submerso ($V/H=2/3$ e $B=5m$)

Figura 3.24 – Relação entre a altura galgada e a área transversal da estrutura

As obras longitudinais aderentes revelam à partida uma maior altura galgada (ΔH) que aumenta para soluções com maior inclinação (Figura 3.24a). Apenas as soluções 1/3 (V/H) e 1/2 (V/H) se apresentam com os valores próximos dos obtidos nos quebramares destacados. Com o aumento do H_s aumenta proporcionalmente o ΔH em ambas as estruturas. Se se fizer

uma comparação entre as duas soluções para a mesma área transversal (27.95m^2) constata-se que para se obter a mesma altura galgada é necessário diminuir a altura de onda incidente em 4m nas obras longitudinais aderentes, já que para os quebramares, nessa área transversal específica, um ΔH de aproximadamente 2.5m corresponde a um H_s de 12m, e nas obras longitudinais aderentes para este mesmo ΔH corresponde um H_s de 8m. De facto, dos resultados obtidos é perceptível uma maior eficácia dos quebramares destacados submersos dentro daquilo que foram os cenários analisados. As duas estruturas associam um maior A_t para uma melhor resposta transversal, mas os quebramares destacam-se com valores numa maior gama de áreas transversais (Figura 3.24b). A Figura 3.25 representa as duas soluções



permitindo a comparação direta dos resultados.

Figura 3.25 –Relação entre a altura de espraçamento galgada e a área transversal para as obras longitudinais aderentes (linha) e os quebramares destacados (tracejado), por altura de onda

Com a observação da Figura 3.25 torna-se perceptível qual o limite até ao qual compensa a realização de qualquer das obras, a nível transversal. Os traços negros representam o cruzamento das soluções para os mesmos valores de altura de onda, com exatamente a

mesma altura galgada em relação à dimensão transversal da estrutura. O que se conclui é que à esquerda dos pontos, todas as combinações referentes aos quebramares destacados representam melhores soluções e à direita destes, passam a ser as obras longitudinais aderentes menos galgáveis. Existe uma gama de valores que se encontra entre as duas soluções, pelo que entre os 33m² e os 39m² a solução menos galgável depende da altura de onda incidente.

Na Tabela 3.13 estão presentes os valores que relacionam a altura galgada e a área transversal de estrutura necessária para contrariar essa altura. Procurou-se perceber como é que os quebramares destacados e as obras longitudinais aderentes, e uma análise mista complementar, evoluem dentro daquilo que é a mitigação total dos galgamentos. Ao ser feita a variação de cada parâmetro físico no estudo interno das estruturas, proporciona-se um aumento da A_t que estará associado, à partida, a melhores desempenhos na mitigação dos galgamentos.

Tabela 3.13 –Área transversal de estrutura para mitigar galgamentos, considerando o cenário de $T=10s$

Praia Natural		Obra longitudinal aderente		Quebramar destacado + Obra longitudinal aderente		
H_s (m)	ΔH (m)	ΔH (m)	A_t (m ²)	ΔH (m)	A_t (m ²)	Tipo de obra
4	0,79	1,83	41,54	-	30,67	$R_c=3$
5	1,48	2,64	51,50	-	41,67	$R_c=2$
6	2,09	3,37	61,35	0,04	54,00	$R_c=1$
7	2,66	4,04	71,11	0,85	70,20	$R_c=3+V/H=1/3$
8	3,19	4,66	80,80	1,17	70,20	
9	3,69	5,25	90,43	1,47	70,20	
10	4,16	5,80	100,01	1,76	70,20	
11	4,61	6,33	109,55	2,04	70,20	
12	5,03	6,83	119,06	2,31	70,20	

Na comparação apresentada na Tabela 3.13, no caso da obra longitudinal aderente o que se estabeleceu como padrão foi acrescentar a diferença de altura galgada à altura existente para uma obra base, para duas diferentes inclinações, com um talude de 1/3 e 2/3 (V/H), mediante

o considerado na forma de aumento analisada no subcapítulo 3.2.2. Nos quebramares destacados submersos, assumiu-se a cota de coroamento à profundidade mínima possível e com uma localização à profundidade de 7m (distância à margem de 410m). Em situações desfavoráveis, como seria necessário aumentar o R_c tornando o quebramar emerso (a partir do $H_s=7m$) juntou-se a um quebramar com $R_c=3$ uma obra longitudinal aderente com talude de $1/3 (V/H)$, de forma a mitigar os galgamentos e a testar a eficácia da solução conjunta. Na Figura 3.26 apresentam-se os gráficos referentes à análise acima referida (Figura 3.26).

Num plano geral, com a análise dos gráficos da Figura 3.26 percebe-se que existem diferenças na solução que se apresenta mais rentável, necessitando de uma menor área transversal (A_t) para mitigar galgamentos na mesma onda incidente, dependendo da inclinação do talude. Para ondas de menor altura e menor período a solução mais aconselhada será o quebramar destacado (Figura 3.26a), representando uma menor área transversal para eliminar galgamentos em cenários com alturas de onda até $H_s=9m$, onde esta se demonstra mais rentável. Nesta fase depende da inclinação adotada, com a obra longitudinal aderente a ser mais rentável para ondas superiores a 9m numa inclinação de $1/3 (V/H)$, deixando de se verificar para a $2/3 (V/H)$. Num plano intermédio, faz-se uma observação focando apenas as ondas incidentes médias e um período associado de 10s, já que a análise feita aos gráficos da Figura 3.26b têm diferentes melhores soluções associadas às alturas de onda em questão. A obra longitudinal aderente neste enquadramento representa melhor solução para um talude $1/3 (V/H)$, onde no $2/3 (V/H)$, fora a zona de coincidência de valores ($H_s=7m$), as soluções com quebramares apresentam-se melhores. Por último, em circunstâncias de agitação mais energéticas associadas a um maior período de onda ($T=12s$), as obras longitudinais aderentes apresentam melhores áreas numa inclinação $1/3 (V/H)$. Já com o talude a $2/3 (V/H)$ a solução mista representa uma solução bem mais rentável, com os $70m^2$ a serem suficientes para mitigar galgamentos até $H_s=11m$.

Percebe-se que o comportamento da obra longitudinal aderente varia bastante. A análise que aqui se desenvolveu revela também que o padrão de aumento das estruturas não favorece inclinações de talude superiores, já que aumenta em grande parte a área transversal necessária para mitigar completamente os galgamentos e estas soluções têm alturas de galgamento associadas bastante superiores comparativamente às inclinações menores.

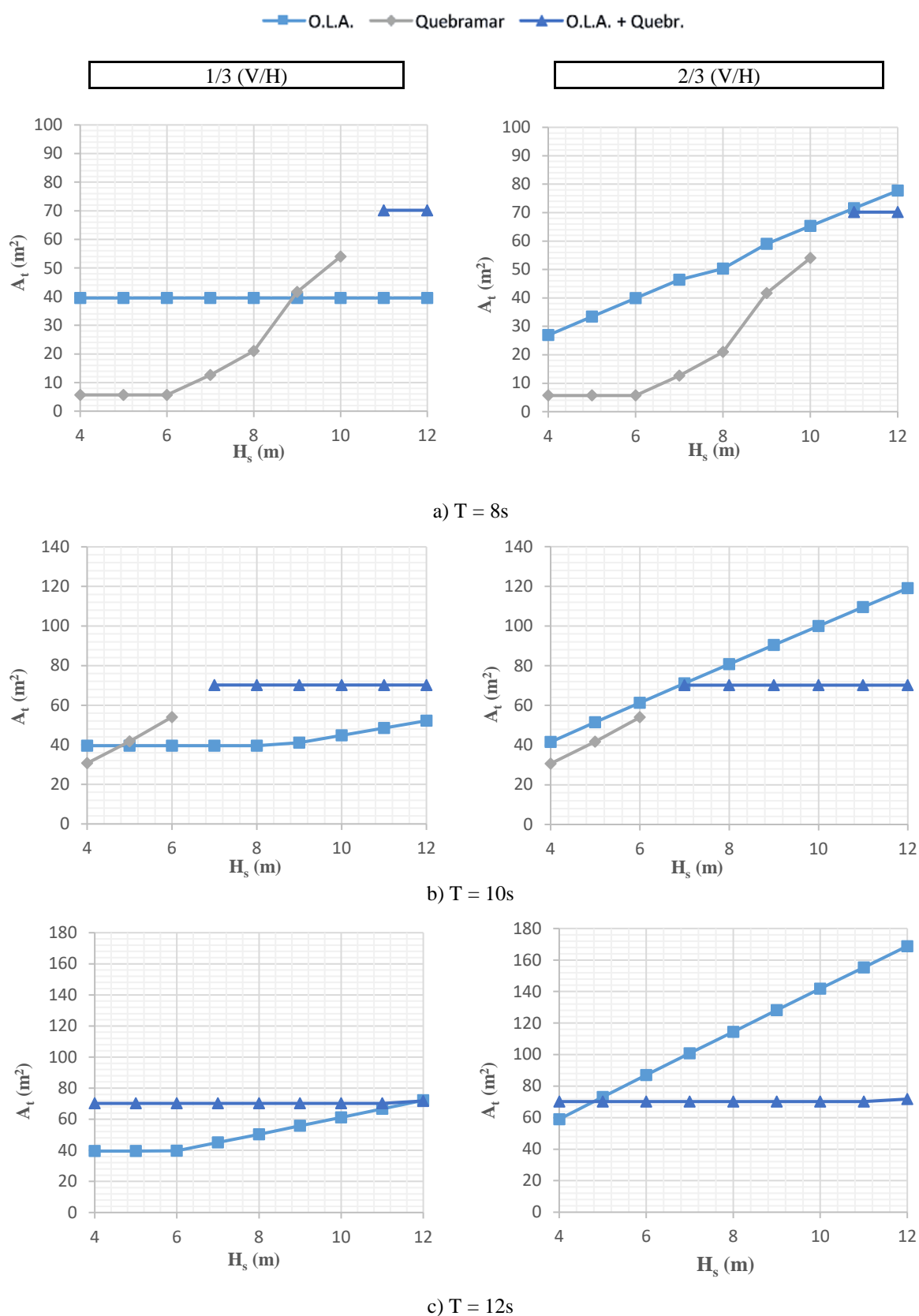
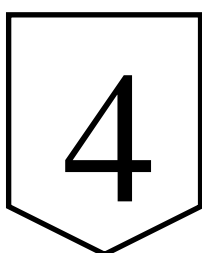


Figura 3.26 – Área transversal mínima para mitigar os galgamentos

Por fim, elaborou-se a Tabela 3.14, onde se resumem alguns dos principais resultados obtidos das duas soluções e se comparam diretamente em cada linha resultados idênticos.

Tabela 3.14 – Comparação direta das duas soluções entre parâmetros equivalentes

Obra longitudinal aderente	Quebramar destacado submerso
∴ Areal não contabilizado na frente da obra para o espraçamento	∴ Areal ajuda para o espraçamento
∴ Variação física principal: → Inclinação (V/H)	∴ Variação física principal: → Cota de coroamento (R_c)
∴ Melhor inclinação: → $V/H=1/3$ <i>com galgamentos a partir $H_s=9m$ ($T=10s$)</i>	∴ Melhor cota de coroamento: → $R_c=1m$ <i>com galgamentos a partir $H_s=7m$ ($T=10s$)</i>
∴ Pior cenário: → $\Delta H = 16.30m$ <i>Média dos cenários + desf. = 8.31m</i>	∴ Pior cenário: → $\Delta H = 4.36m$ <i>Média dos cenários + desf. = 3.86m</i>
∴ Perda de rendimento com o aumento do V/H → Melhor = 41% <i>Independente do H_s</i>	∴ Perda de rendimento com o aumento da distância R_c → Melhor = 27 a 30% <i>Depende do H_s</i>
∴ Espessura de 2.5m não variável na modelação efetuada	∴ Largura de coroamento (B) com pouca variação a partir dos 5m
∴ Área transversal da melhor solução: → $A_t= 40m^2$	∴ Área transversal da melhor solução: → $A_t= 55m^2$



ANÁLISE EM PLANTA: IMPACTO NA LINHA DE COSTA

Entendendo a faixa costeira como uma área de interface entre os subsistemas terra-mar, constitui uma área dotada de grande mutabilidade, que se encontra em conflito com o atual cariz permanente da presença humana, pelo que a fragilidade tem a sua maior expressão na erosão e no recuo da linha de costa, fenómeno que tem vindo a resultar na perda de áreas de valor ecológico-ambiental e económico, que é acentuada pelas condições climáticas e de agitação marítima (Pedrosa, 2012). Dessa maneira, propôs-se estudar os recuos da linha de costa diretamente ligados à consequência da implementação de obras rígidas de defesa costeira, para que se torne mais claro quais os seus impactos (positivos ou negativos). Na continuidade do trabalho desenvolvido, nomeadamente obras longitudinais aderentes e quebramares destacados.

4.1 Considerações iniciais

O GENESIS, *GENeralized model for SIMulating Shoreline change*, foi desenvolvido pelo U.S. Army's Corps of Engineers. Este modelo numérico simula as alterações da posição da linha de costa de uma determinada região, sendo capaz de determinar os respetivos avanços e recuos (Hanson e Kraus, 1989). Este é um sistema de modelos numéricos que permite a simulação da alteração do litoral durante um longo período, de meses a anos, causada principalmente pela ação das ondas e pela presença de estruturas. A escala física do comprimento horizontal do modelo varia de um a dez quilómetros. Com a rebentação das ondas incidentes com um dado ângulo em relação à linha de costa, é provocado um transporte sedimentar longitudinal ao longo do litoral e os gradientes entre os volumes que entram e saem num determinado trecho costeiro fazem avançar ou regredir a linha de costa. O sistema é generalizado, no sentido em que o modelo pode ser usado para simular as alterações no litoral com uma grande variedade de configurações de praia e de estruturas na costa. Nos pressupostos de cálculo, o modelo assume que a forma do perfil transversal se mantém constante, existindo apenas movimentos de translação da posição da linha de costa para terra ou para o mar. Este programa pode auxiliar a serem encontradas soluções de engenharia mais adequadas em termos socioeconómicos, para fazer face aos problemas de proteção nas zonas costeiras (Coelho, 2005; Simões, 2013). Os testes relativos ao comportamento da linha de costa sob o efeito de diferentes cenários de obras longitudinais aderentes e quebramares destacados submersos foram efetuados através de modelação no GENESIS, considerando uma agitação incidente regular, alterando as características das

soluções possíveis de análise, visto que associados a cada uma delas se encontram comportamentos diferentes na linha de costa definida.

Os cenários modelados tiveram por base a representação de uma linha de costa linear numa extensão de 10km, com batimetria e topografia regular, de acordo com o perfil transversal desenvolvido no capítulo anterior. A linha de costa é representada no eixo longitudinal sobre o valor 1600 e foi dividida em 501 pontos (20 em 20m). A agitação ao largo foi considerada constante, com um ângulo de proveniência de 20° em relação à linha de costa. Os cenários de simulação avaliados assumiram um horizonte temporal de 5 anos, sendo este o parâmetro temporal genérico de comparação.

No desenvolvimento do estudo, modelaram-se uma totalidade de 65 cenários no GENESIS, com cenários referentes às estruturas analisadas (quebramar destacado - *QB* e obra longitudinal aderente - *OLA*), cenários de praia sem obra, cenários adicionais e cenários comparativos. A Figura 4.1 elucida o peso de cada tipo de modelação na totalidade dos cenários modelados.

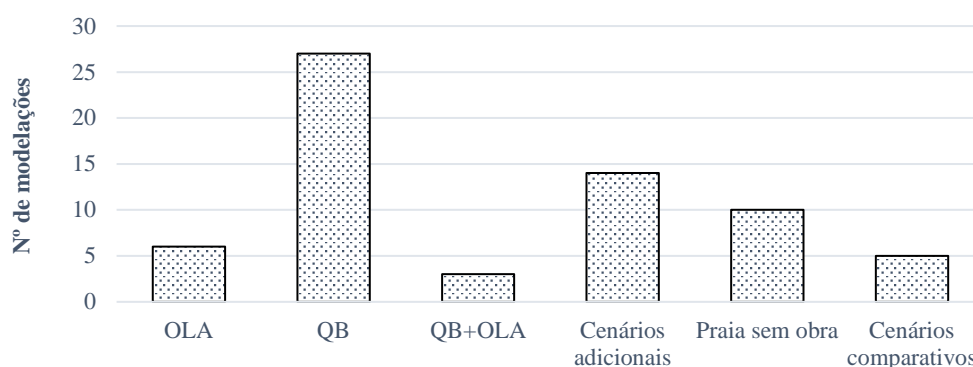
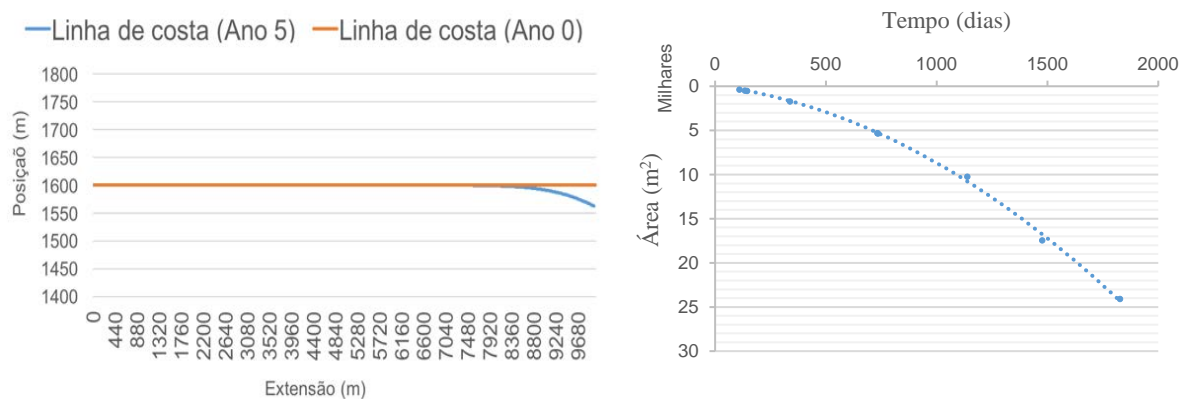


Figura 4.1 - Casos de modelação longitudinal analisados

Como cenário de referência, procedeu-se à simulação da evolução da linha de costa num contexto em que não se considera nenhuma estrutura de defesa costeira. Neste cenário, a condição fronteira na extremidade direita da área modelada assumiu um recuo à velocidade de 0.02m/dia, com os coeficientes de transporte sedimentar, K_1 e K_2 , com os valores de 0.20 e 0.15, respetivamente. A Figura 4.2 apresenta os resultados no cenário de referência, sem intervenções de defesa costeira, representando a posição da linha de costa depois de 5 anos (Figura 4.2a) e a evolução temporal do total de área perdida (Figura 4.2b).



a) Posição da linha de costa ao fim de 5 anos

b) Área perdida ao longo do tempo

Figura 4.2 – Resultados da simulação do cenário de referência

Verifica-se que ao fim dos 5 anos de simulação da praia natural desenvolve-se uma zona de erosão que se estende até cerca de 2.3km da fronteira da área de estudo, correspondendo uma área total de recuo de aproximadamente $24\,051\text{m}^2$ e com um recuo máximo de 1562m.

Ao longo da simulação a área perdida em cada ano vai sendo cada vez maior. No primeiro ano perdem-se $2\,201\text{m}^2$, mas estudando a simulação a 10 anos, no último ano de simulação a perda seria de $10\,067\text{m}^2$, chegando a uma totalidade de área de recuo de $68\,354\text{m}^2$ em 10 anos. O teste a 10 anos permitiu confirmar que o horizonte temporal assumido nos cenários de simulação ainda se encontra longe de uma situação de equilíbrio e existe um aumento da perda sedimentar anual.

Tendo o conhecimento do funcionamento dos modelos numéricos unidimensionais, a evolução da costa é representada pelas variações de posição da linha que corresponde à interceção do plano de água com a fronteira terrestre e com a presença das estruturas de defesa. O seu funcionamento baseia-se no cálculo do transporte sólido longitudinal, efetuado a partir das características de onda (Coelho, 2005). Na análise desenvolvida, fez variar as características físicas dos quebramares destacados submersos e das obras longitudinais aderentes, mantendo como base os restantes parâmetros introduzidos. Desta forma, subdividiu-se o estudo por solução estrutural. Nas obras longitudinais aderentes, a nível longitudinal, o parâmetro testado foi o comprimento da obra (L), enquanto que nos quebramares destacados é possível analisar o efeito da variação do coeficiente de transmissão (K_t) e o afastamento à linha de costa (d). Os valores entre os quais existiu

variação dos parâmetros apresentam-se na Tabela 4.1, associados às dependências das opções tomadas na análise transversal, onde o K_t depende da combinação entre H_s e R_c e o d dependendo da profundidade a que a obra está implantada, respeitando a batimetria e o perfil transversal.

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros físicos dos quebramares destacados de análise e as dependências provenientes da análise transversal

K_t (Depende do H_s e R_c)		d (Depende da profundidade - p)	L
0,48	$H_s = 11 \text{ m}$ $R_c = 1 \text{ m}$	115m $p = 3 \text{ m}$	100 m
0,67	$H_s = 4 \text{ m}$ $H_s = 7 \text{ m}$ $H_s = 8 \text{ m}$ $R_c = 3 \text{ m}$ $R_c = 5 \text{ m}$ $R_c = 6 \text{ m}$	247m $p = 5 \text{ m}$	200 m
0,86	$H_s = 4 \text{ m}$ $R_c = 6 \text{ m}$	410m $p = 7 \text{ m}$	400 m

Nos valores adotados do K_t , optaram-se por 3 valores representativos dos cenários anteriormente avaliados, ou seja, um pequeno, um médio e um alto. Como estes resultam do R_c do quebramar destacado, manteve-se o mesmo critério na escolha dos valores deste parâmetro, já que este entra diretamente na definição do K_t e serve para o cálculo do volume das obras, onde cada K_t está associado a uma área transversal devido ao R_c .

Fez-se a quantificação das áreas de erosão ou acreção associadas à construção das estruturas em 3 zonas, junto à fronteira da zona modelada, a sotamar das estruturas analisadas e numa em frente das obras, onde ocorre a formação de um tómbolo em certos cenários. Estas áreas foram designadas respetivamente por A_1 , A_2 e A_3 . Outro dos parâmetros de avaliação na análise em planta é o maior recuo da linha de costa (Y_g) associado à construção de cada estrutura, medindo assim o areal restante na zona mais afetada. A Figura 4.3 esquematiza as considerações adotadas.

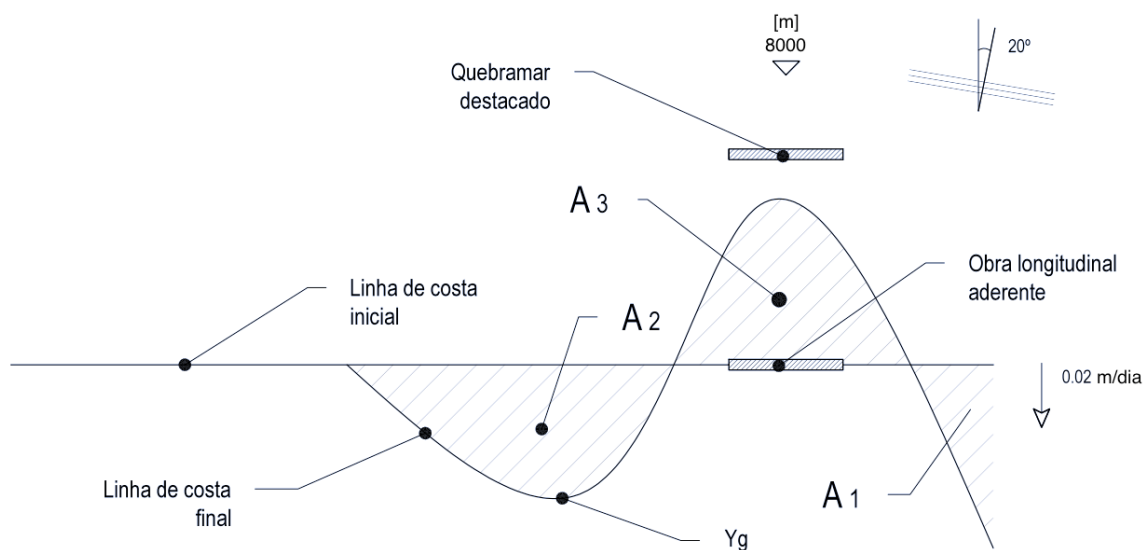


Figura 4.3 - Identificação das considerações adotadas na análise da variação da posição linha de costa

4.2 Obra longitudinal aderente

As obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados provocam uma resposta diferente na linha de costa, como tal a abordagem no GENESIS é efetuada separadamente. A Figura 4.4 ilustra a resposta esperada da linha de costa com a implementação de uma obra longitudinal aderente, onde existe um maior recuo da linha de costa a sotamar da estrutura, que aumenta desta forma a erosão naquela zona com a sua presença.

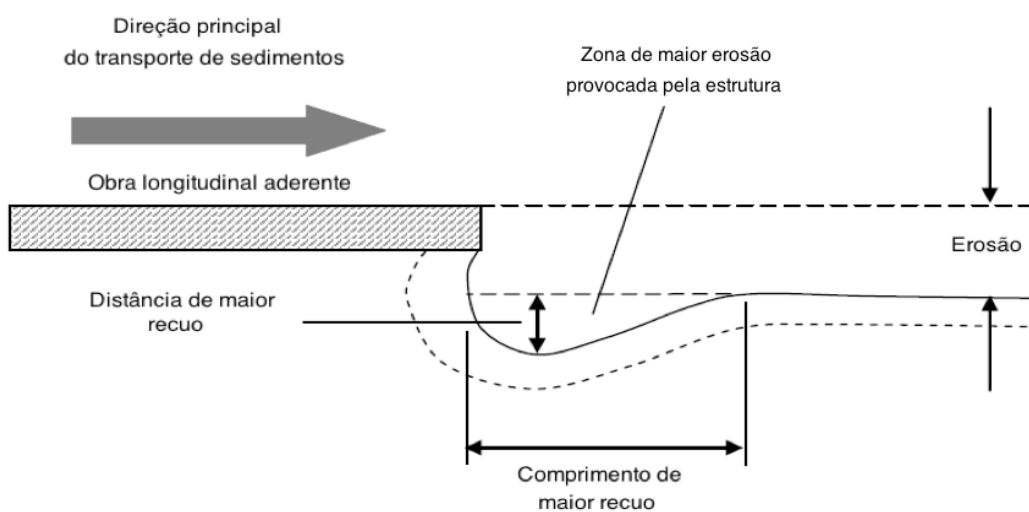


Figura 4.4 – Resposta da linha de costa à presença de uma obra longitudinal aderente

Com base no conhecimento do comportamento esperado após a construção da obra longitudinal aderente, definiram-se três cenários considerando diferentes comprimentos para a estrutura (100, 200 e 400m). O eixo de implementação da estrutura foi definido a 2km da extremidade direita da área modelada. Para além desta posição, modelou-se também a obra no eixo a 1km de distância da mesma extremidade, testando assim a sensibilidade do posicionamento da estrutura.

4.2.1 Análise de sensibilidade

Os gráficos presentes na Figura 4.5 correspondem ao comportamento da linha de costa obtido com a presença da obra longitudinal aderente, para os diferentes comprimentos da estrutura, analisados em função da sua localização.

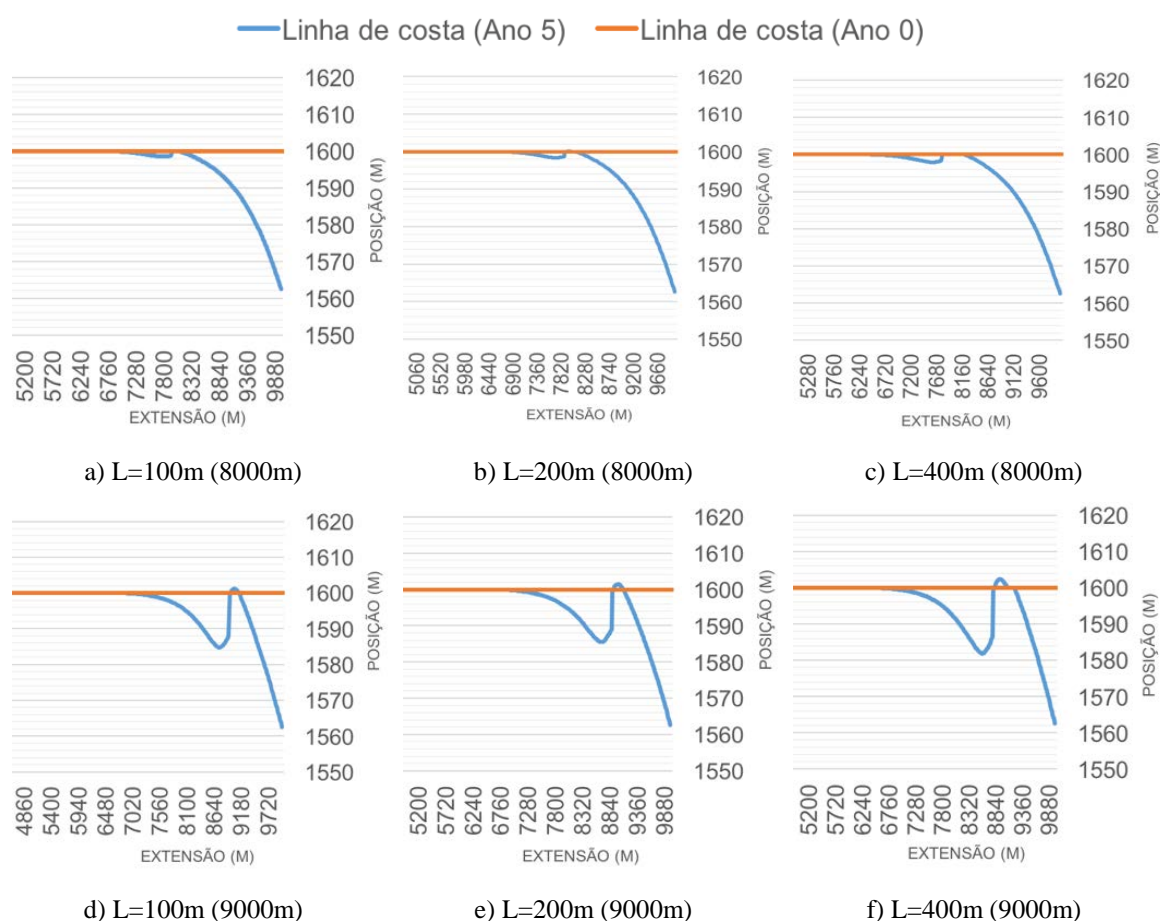


Figura 4.5 – Comportamento da linha de costa a 5 anos na presença da obra longitudinal aderente para diferentes eixos e comprimentos de obra

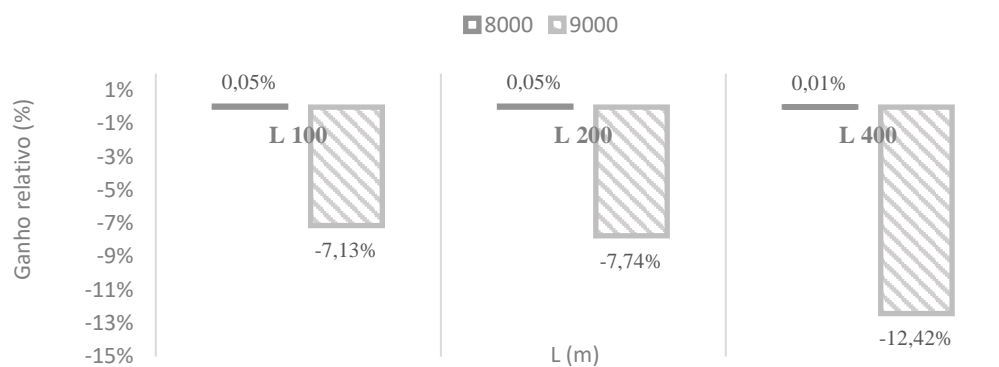
Os resultados obtidos do GENESIS definem a posição da linha de costa ao longo do tempo de modelação. A partir destes resultados calcularam-se as áreas ganhas ou perdidas no tempo. Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores relativos às áreas de erosão (A_1 e A_2) e de acreção (A_3), em função do eixo de implantação da obra longitudinal aderente.

Tabela 4.2 – Áreas de erosão e acreção na presença da uma obra longitudinal aderente com diferentes eixos de inserção e comprimentos de obra

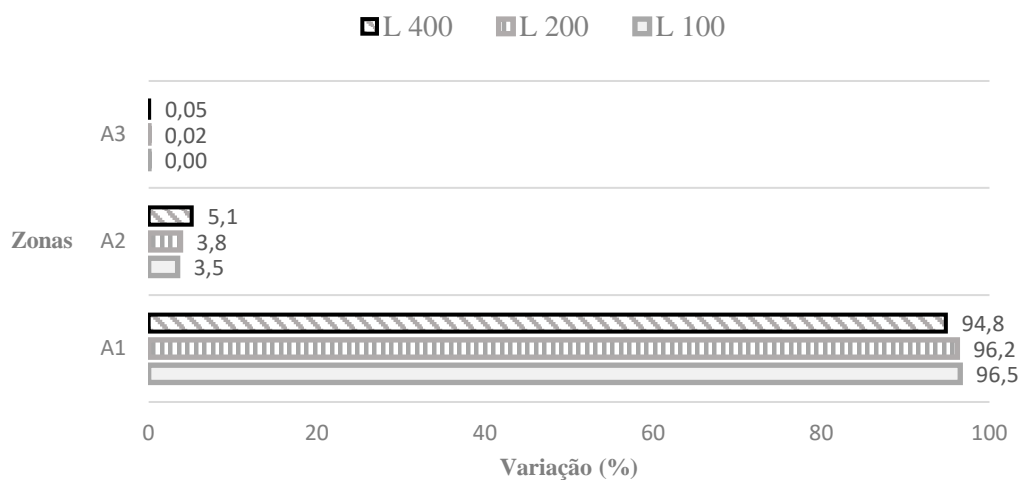
Posição (m)	L=100m		L=200m		L=400m	
	8000	9000	8000	9000	8000	9000
A_1 (m ²)	23207	14831	23156	15222	22833	13643
A_2 (m ²)	832	11055	913	10863	1234	13783
A_3 (m ²)	1	121	4	172	13	387
ΣA	-24039	-25064	-24064	-25913	-24054	-27039

4.2.2 Discussão de resultados

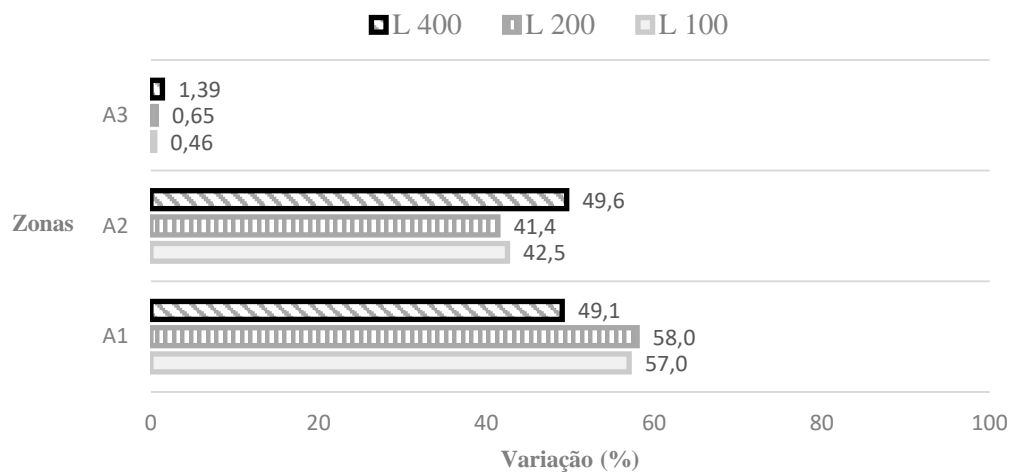
Nos cenários analisados, a variação do comprimento das obras longitudinais aderentes não resulta em diferenças significativas na posição da linha de costa ao fim de 5 anos, nem consequentemente nas áreas de erosão. Para o eixo 8000, a erosão verificada é quase igual à do cenário de referência, protegendo desta maneira o local de inserção da obra. A estrutura antecipa o recuo da linha de costa no lado de sotamar, na ordem dos 2 a 3m. Ao deslocar 1km a posição da estrutura no sentido da zona que se encontra em erosão, a obra longitudinal aderente fixa este território, mas antecipa maiores valores de erosão na zona a sotamar da estrutura (A_2). Com esta alteração, verifica-se também um ligeiro avanço da linha de costa na frente da estrutura, que vai aumentando de forma bastante ligeira com o aumento do comprimento da obra longitudinal aderente. Também foram calculados os valores totais das áreas de erosão e acreção (ΣA), a partir dos quais se elaboraram os gráficos de estudo desta solução, representados na Figura 4.6.



a) Percentagem relativa de ganho/perda após a comparação com o cenário de referência



b) Peso de cada área nos diferentes comprimentos de obra analisados, para o eixo 8000



c) Peso de cada área nos diferentes comprimentos de obra analisados para o eixo 9000

Figura 4.6 –Comportamento da linha de costa na presença de uma obra longitudinal aderente

O comportamento em planta das obras longitudinais aderentes não apresenta diferenças consideráveis comparativamente com aquilo que foi a resposta da linha de costa no cenário de referência, onde se verificou uma área de erosão A_1 de 24 051m². Na solução modelada, e para o eixo localizado a 8000m, com os 3 comprimentos de estrutura testados obteve-se um pequeno ganho, na ordem dos 0.05%, valor com tendência a diminuir ligeiramente com o aumento do L . Com o eixo localizado a 9000m, o comportamento obtido transmite que a estrutura tem mais impacto na linha de costa, com a zona de erosão A_1 a diminuir, com uma tendência de aumento da zona de erosão a sotamar (A_2) (Figura 4.6c), fazendo com que as áreas A_1 e A_2 se apresentem mais idênticas, o que não acontece com o eixo localizado a 8000m, onde a zona A_1 assume perto de 95% da área total variada em 5 anos.

4.3 Quebramar destacado submerso

Na análise dos quebramares destacados em planta conjugaram-se os 3 parâmetros físicos em análise, onde cada um deles foi modelado com 3 valores distintos, proporcionando 27 cenários de simulação. A Figura 4.7 representa as considerações assumidas para os cenários com quebramares destacados, bem como a tendência de alteração da posição da linha de costa num caso genérico de solução com dois quebramares.

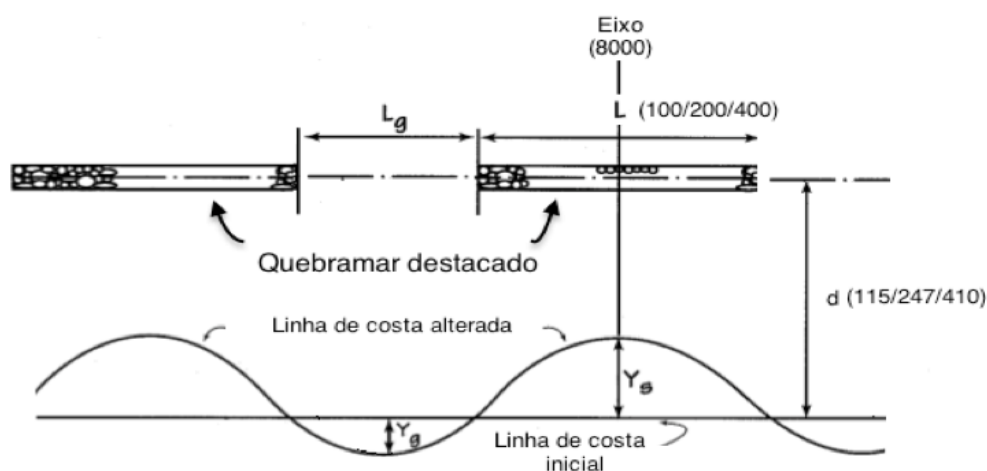


Figura 4.7 – Nomenclatura associada ao comportamento em planta da linha de costa na presença de quebramares destacados (adaptado de David, 2006).

Relativamente ao L e ao L_g presentes na Figura 4.7, representam o comprimento da estrutura e o espaçamento entre estruturas em soluções com mais do que um quebramar, respetivamente. Já os parâmetros Y_g e Y_s são referentes às distâncias de erosão e acreção provocadas pelas obras, respetivamente. Para facilitar a análise e observação dos cenários elaborados, devido à sua extensão, designou-se a nomenclatura “cenário $L.d.K_t$ ”. Com a alteração destes parâmetros altera-se o nome do cenário, começando no *cenário 1.1.1* e colmatando no 3.3.3. Na Tabela 4.3 apresenta-se a ordem de designação que associa os valores a cada combinação. Por exemplo, quando se fala da combinação $L=200m$, $d=115m$ e $K_t=0.67$ designa-se o *cenário 2.1.2*.

Tabela 4.3 – Nomenclatura para as combinações modeladas dos quebramares

	L [m]	d [m]	K_t [-]	Nº
Cenário $L.d.K_t$	100	115	0,48	1.
	200	247	0,67	2.
	400	410	0,86	3.

4.3.1 Análise de sensibilidade

Na Figura 4.8 apresentam-se os gráficos resultantes da modelação dos cenários com quebramares destacados, cuja representação ilustra a diferença de comportamento em função dos parâmetros analisados. Devido à extensão de dados apenas se colocam os necessários para verificação do desempenho de cada. Só se ilustram 9 cenários a título de exemplo, com a evolução dos 3 parâmetros.

Os resultados indicam que, com o aumento do comprimento da estrutura existe um proporcional aumento da área do tómbolo, bem como da distância Y_g , com efeito direto nas áreas A_3 e A_2 , respetivamente. A zona A_1 tende a não ser afetada pela extensão do quebramar. A maior distância da estrutura à linha de costa transmite um menor impacto na resposta da linha de costa, provocando uma pequena diminuição das áreas de erosão e acreção. A variação do coeficiente de transmissão, K_t , tem uma influência significativa na posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação.

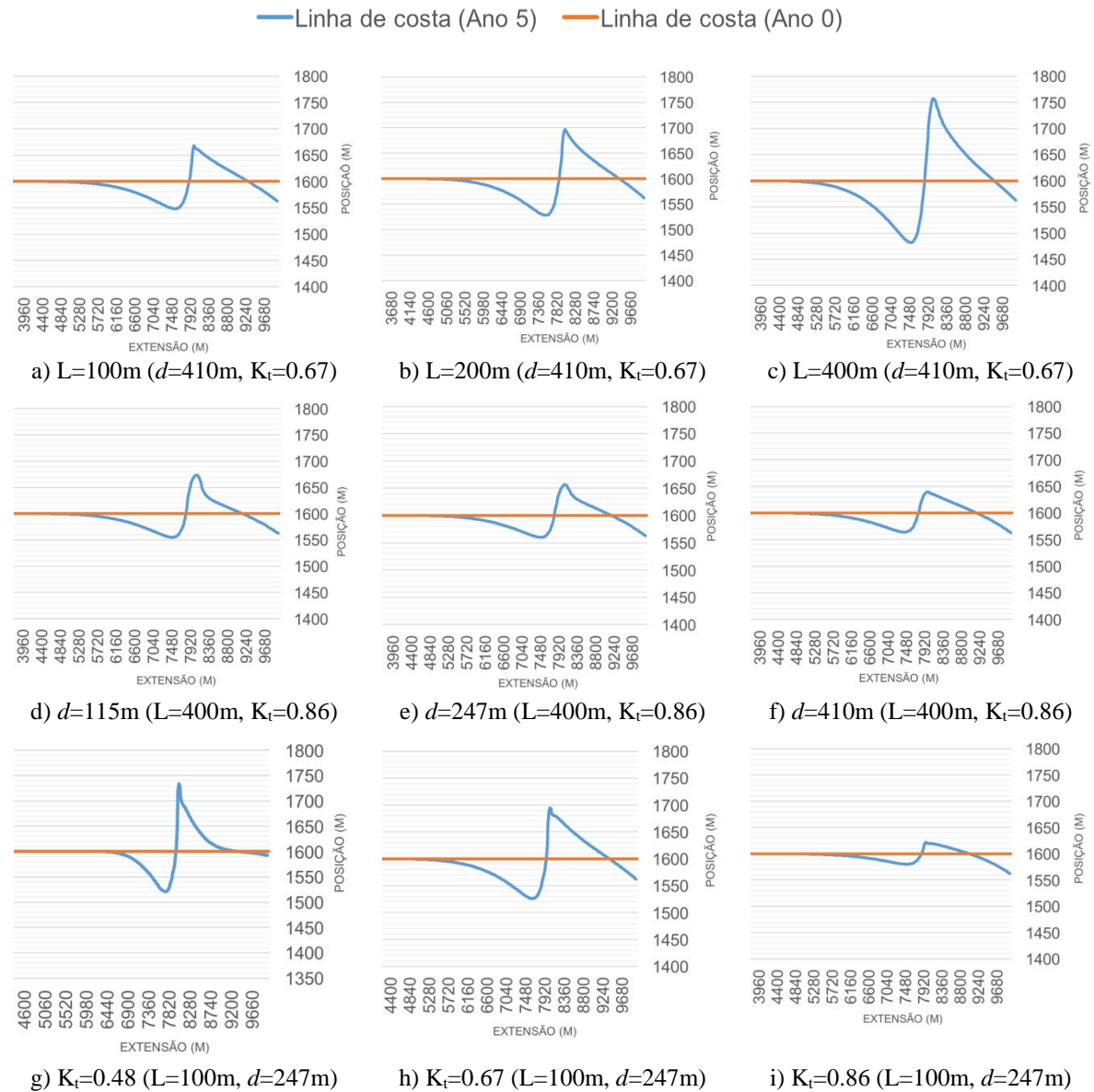


Figura 4.8 - Posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação, variando as características físicas da estrutura, respectivamente L (a, b, c), d (d, e, f) e K_t (g, h, i)

Com o aumento dos valores deste parâmetro e a consequente menor influência na propagação da agitação, existe uma diminuição das áreas A_2 e A_3 , representando um impacto menor sobre a linha de costa. Esta variação não é proporcional aos valores de K_t , pois aumenta progressivamente com o aumento do K_t (diferença entre Figuras 4.8h e 4.8i é mais evidente que entre Figuras 4.8g e 4.8h). Neste processo, a área A_1 é a única zona que tende a aumentar, verificando-se a diminuição das restantes. Nas Tabela 4.4, 4.5 e 4.6

apresentam-se os valores relativos às áreas de erosão (A_1 e A_2), áreas de acreção (A_3), o recuo máximo Y_g e a área total ($\Sigma A = A_3 - A_2 - A_1$) tabelados por comprimento de estrutura.

Tabela 4.4 - Áreas de erosão e acreção na presença da um quebramar com comprimento de 100m

d (m)	115			247			410		
K_t	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86
A_1 (m ²)	619	10627	18279	2015	11011	16122	7989	12402	16122
A_2 (m ²)	20424	87586	13886	48464	79698	23285	162499	59601	23286
A_3 (m ²)	20760	67549	6806	48716	60763	13655	137483	43709	13655
ΣA (m ²)	-283	-30664	-25359	-1879	-29946	-25725	-33004	-28294	-25725
Y_g (m)	49	83	37	79	74	37	160	52	37

Tabela 4.5 - Áreas de erosão e acreção na presença da um quebramar com comprimento de 200m

d (m)	115			247			410		
K_t	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86
A_1 (m ²)	1613	4785	16949	4943	10420	16067	7595	11168	14962
A_2 (m ²)	19525	57661	25259	139555	97531	26365	177493	81844	32624
A_3 (m ²)	21065	54454	13763	132229	77329	16601	151199	63364	20943
ΣA (m ²)	-73	-7992	-28445	-12269	-30621	-25831	-33888	-29648	-26643
Y_g (m)	51	73	37	159	89	37	168	72	37

Tabela 4.6 - Áreas de erosão e acreção na presença da um quebramar com comprimento de 400m

d (m)	115			247			410		
K_t	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86	0,48	0,67	0,86
A_1 (m ²)	3347	2484	14599	4321	9479	14170	7169	9406	14286
A_2 (m ²)	29602	41795	52363	109461	128376	46484	219911	131602	41880
A_3 (m ²)	32625	42293	38524	109334	122819	33799	193403	108867	29200
ΣA (m ²)	-325	-1987	-28439	-4448	-15036	-26854	-33677	-32141	-26966
Y_g (m)	70	73	45	146	144	40	205	118	37

Dos 27 cenários modelados, 8 não concluíram os 5 anos de simulação devido à completa formação do tómbolo, com a ligação da linha de costa à estrutura. Este comportamento ocorreu para comprimentos de obra distintos, mas para similares valores de distância à linha de costa (d) e de coeficiente de transmissão (K_t). Os cenários para os quais o tómbolo ficou completo em menos de 5 anos foram: 1.1.1, 2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.2.1 e 3.2.2. A Figura 4.9 ilustra o comportamento referido destes cenários.

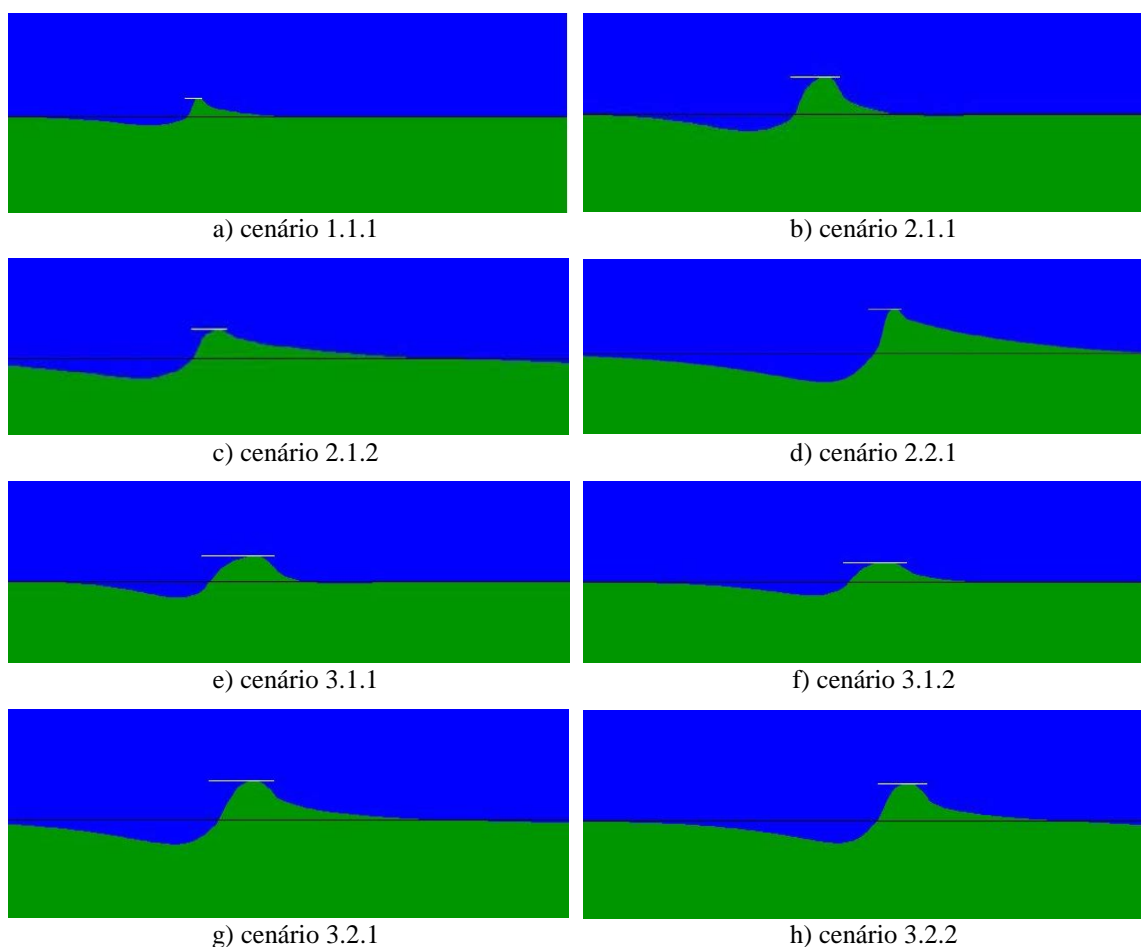


Figura 4.9 – Comportamento longitudinal das linhas de costa que completaram o tómbolo antes de 5 anos

De facto, são as combinações com menor K_t (cota de coroamento mais alta) e mais perto da linha de costa que evoluem de forma mais rápida, provocando uma mais rápida formação completa do tómbolo. Este comportamento também se verifica para relações entre o comprimento do quebramar e a distância à linha de costa (L/d) superiores, ou seja, para os casos em que a obra é comprida em relação ao afastamento à linha de costa, provocando

uma vasta zona de deposição. Isso evidencia-se com os valores presentes no gráfico da Figura 4.10, que associa a área de tómbolo formado com o tempo de formação, para cada caso.

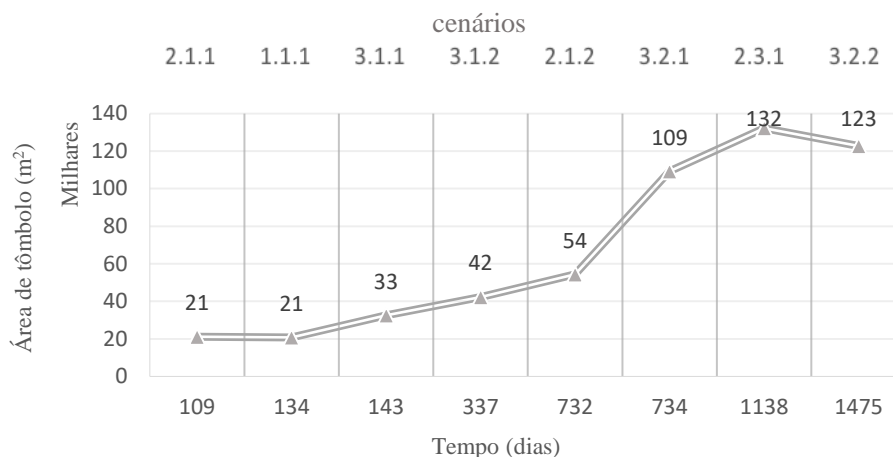


Figura 4.10 – Evolução da área de tómbolo formado completo por tempo de formação em cada caso ocorrido

Nesta, quando observado a diferença de área de tómbolo entre os casos 2.1.2 e 3.2.1, torna-se perceptível o acima mencionado, onde a diferença entre áreas de tómbolo é de aproximadamente 50 000m², e a nível temporal apenas com diferença de dois dias. Assim, entende-se que a combinação com um $L=400$, $d=247$ e $K_t=0.48$ é das que impõe uma alteração à linha de costa mais rápido.

Outro dos fatores avaliadores das combinações modeladas em cada cenário é o resultado do Y_g . Verificou-se a ocorrência de maiores recuos a sotamar da estrutura (zona A₂) para K_t menores, sendo que com o aumento deste parâmetro existe uma diminuição desse comportamento. A Figura 4.11 ilustra isso mesmo, onde os cenários com $K_t=0.48$ representam distâncias de Y_g maiores (maiores recuos em relação à linha de costa). Dentro do mesmo K_t , o comportamento que se verifica é um aumento do Y_g para cenários que combinem maiores distâncias da estrutura à linha de costa com maiores comprimentos de obra. Verifica-se ainda que no $K_t=0.864$ ($R_c=6m$), os resultados são semelhantes para todos os cenários elaborados, o que revela uma maior importância da altura da estrutura em relação às restantes características físicas analisadas.

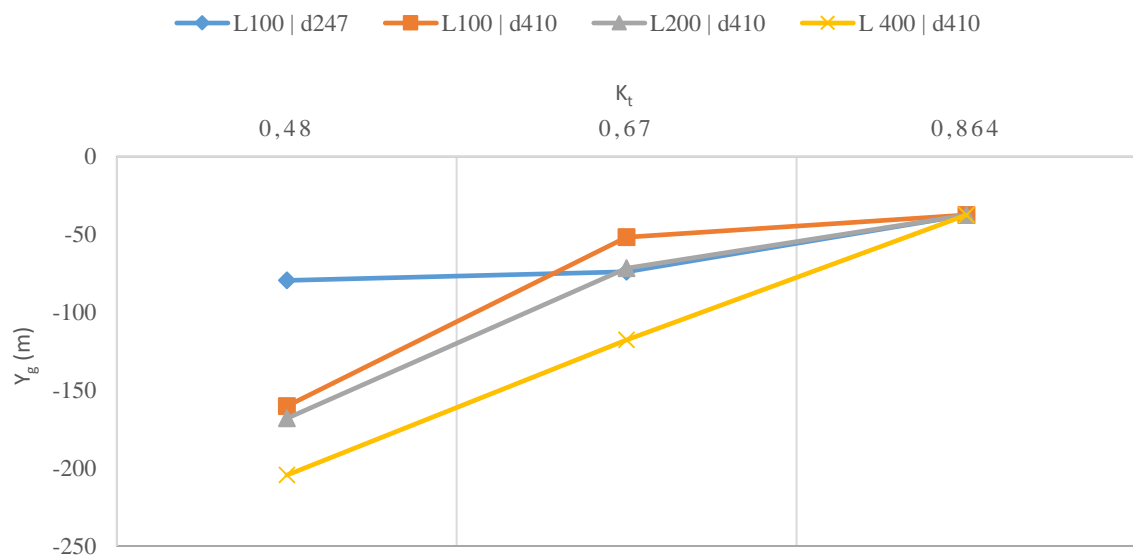


Figura 4.11 – Y_g de diferentes cenários para os 3 coeficientes de transmissão analisados

4.3.2 Discussão de resultados

O comportamento dos quebramares destacados em planta apresenta na totalidade dos cenários modelados um grau alto de variação da posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação, tanto nas áreas de erosão como na formação do tómbolo. O balanço de áreas em planta desta solução é maioritariamente negativo quando comparado com o cenário de referência. No tratamento de dados, a abordagem utilizada passou por relacionar a variação de áreas de acreção e erosão com a área perdida no cenário de referência. Nesta análise, compara-se então o ΣA de cada cenário com a área perdida no cenário de referência, percebendo-se assim se existe perda ou ganho com a implementação da obra, avaliando-se desta forma o desempenho em planta de cada solução.

Conclui-se que grande parte dos casos representam uma perda de areal, neste plano temporal de 5 anos. As combinações que apresentam com ganho são apenas as que não concluíram a análise devido à formação completa do tómbolo, onde a comparação foi realizada no instante temporal da formação do tómbolo. O *cenário 2.1.1* é representativo do referido, com um ganho de 80% de área. Este cenário foi simulado em 109 dias e obteve-se um ΣA de -73 m^2 nesse período. No cenário de referência, para o mesmo tempo de análise, o recuo foi de -359 m^2 . Embora se estejam a tratar de áreas pequenas, existe um ganho relativo que vai diminuindo com o decorrer do tempo, passando depois a perda de território por comparação

com o cenário de referência. Num contexto geral, apenas o *cenário 1.2.1* representa ganhos ao fim de 5 anos de simulação, assumindo 92% de ganho relativo. Este cenário apresenta um comportamento que se afasta da tendência genérica, pois com o aumento do K_t se regista-se uma diminuição do ΣA . Neste cenário, os resultados obtidos contrariaram essa tendência, onde se regista um aumento das áreas de erosão e acreção para o K_t 0.67. Assume-se como o melhor cenário analisado, com grande diferença dos similares, já que é o único cenário que não completando a formação completa do tómbolo e mesmo assim regista ganho entre as áreas de erosão e acreção. Por esse motivo analisa-se este comportamento com algumas considerações, entendendo-se que as dimensões específicas desse cenário devem ser foco de análise.

Na Figura 4.12 compara-se diretamente o desempenho em planta de cada um dos cenários, onde se faz um balanço entre a área em erosão no cenário de referência e nestes, com exceção daqueles cenários que, ou pela formação completa do tómbolo ou pelo comportamento fora de contexto, se tornam inconclusivos. Obtiveram-se em todos eles perdas relativas entre os 5% e os 41%.

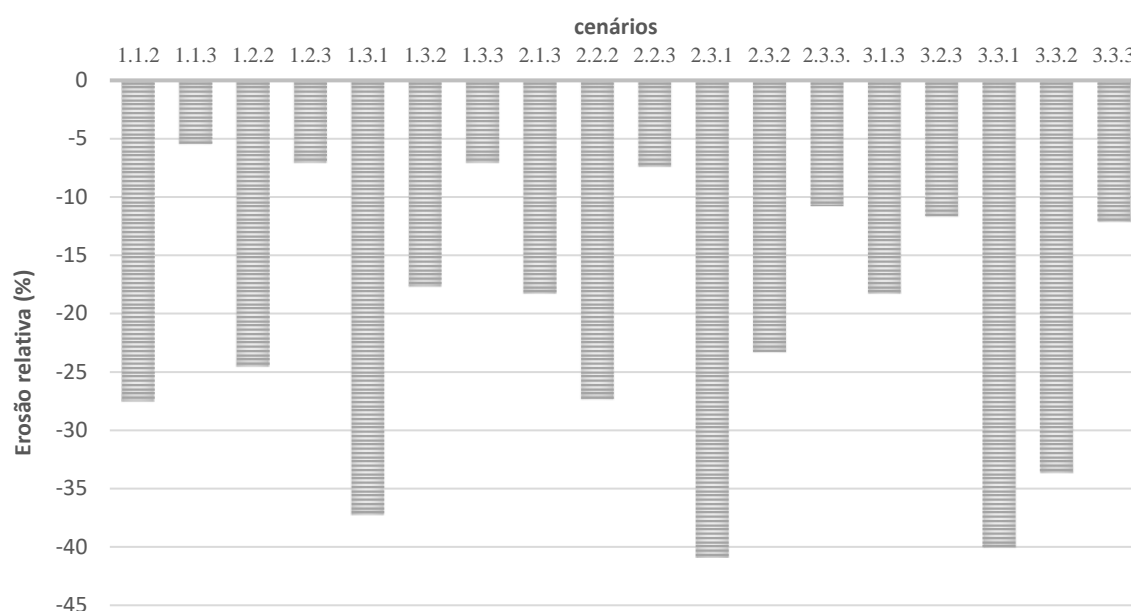


Figura 4.12 – Erosão relativa por cenário modelado em relação ao cenário de referência

Dos desempenhos obtidos dos cenários acima apresentados destacam-se duas tendências gerais. Mantendo o mesmo comprimento de obra e a mesma distância à linha de costa, com o aumento do K_t diminuem as áreas de erosão e acreção provocadas pela implementação da obra. De entre os registos que se apresentaram com menor impacto destaca-se o cenário 1.1.3 com -5% e os cenários 1.2.3, 1.3.3 e 2.2.3 com -7%, tendo todos como ponto em comum os $K_t=0.864$. Relativamente aos casos com menor desempenho surgem os cenários 2.3.1 e 3.3.1 com -41%, tendo estes dois parâmetros em comum, o $d=410\text{m}$ e o $K_t=0.48$.

De forma a ser feita uma análise com outra perspetiva analisaram-se os cenários do comprimento da obra com o afastamento à linha de costa (L/d). Não existe um comportamento linear previsível de evolução de cada área analisada, já que com o aumento da proporção L/d não se demonstra uma tendência clara. Existem, contudo, situações melhores que outras onde o valor de A_3 é superior e é possível ter uma maior área de acreção para colmatar recuo da linha de costa. Com base na relação L/d , é possível admitir que com o aumento da proporção L/d existe uma tendência de perda de áreas, com uma tendência de maiores perdas para valores de K_t menores, associados a maiores áreas das secções transversais das estruturas (Figura 4.13).

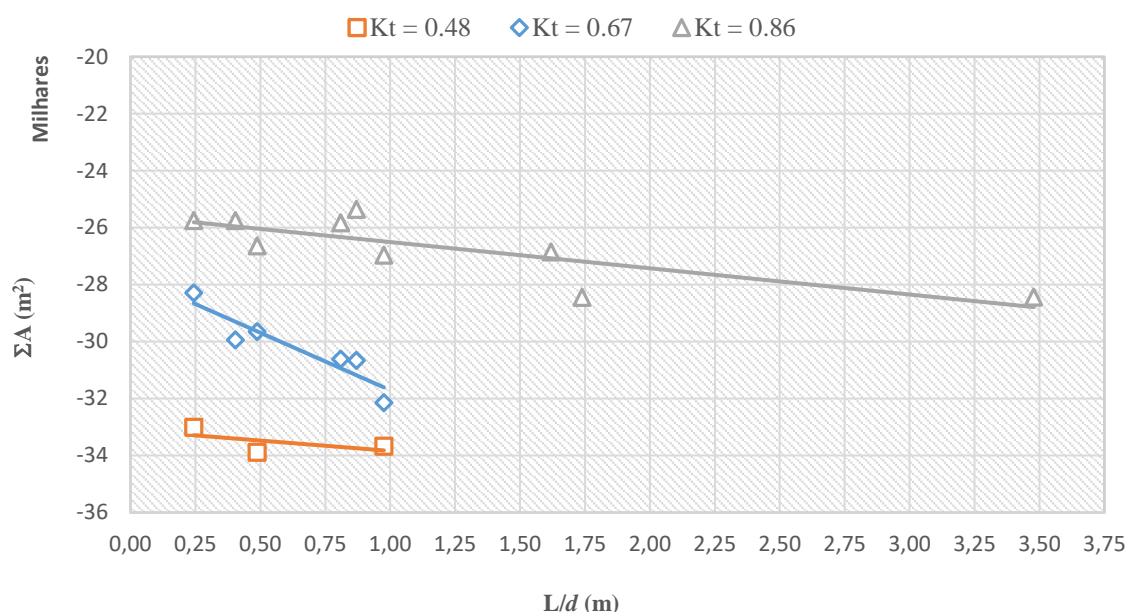


Figura 4.13 – Variação total das áreas da linha de costa dos cenários modelados por K_t

Entre os valores de K_t existem proporções que se revelam acima da média linear traçada (linha de cor) de ΣA , representando soluções com menor impacto na linha de costa e uma maior viabilidade de aplicação, já que protegem uma maior área e têm um impacto menor quando comparadas com soluções semelhantes. Isso verifica-se nas proporções $L/d=0.8$, para diferentes valores de K_t .

4.4 Cenários adicionais

Com interferência no comportamento das estruturas em planta verificou-se que para além dos parâmetros anteriormente analisados existem um conjunto de outros fatores e cenários com importância no resultado final, merecendo atenção e pelo menos o conhecimento da sua dinâmica no contexto de estudo analisado. Assim, foram avaliados os cenários que conjugam um quebramar destacado e uma obra longitudinal aderente, dois quebramares destacados, um quebramar destacado numa zona costeira em equilíbrio, alteração dos coeficientes K_1 e K_2 associados ao transporte sedimentar e o alargamento do período temporal de simulação para 10 anos.

4.4.1 Quebramar destacado submerso e obra longitudinal aderente

Depois das obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados submersos serem analisados individualmente, estuda-se agora um contexto onde ambas coexistam, com o intuito de se perceber se é benéfica a implementação de ambas as obras na mesma intervenção. Para tal escolheu-se o cenário de maior variação da linha de costa imposta por um quebramar isolado, o *cenário 2.3.1*, utilizando esta modelação com diferentes comprimentos da estrutura. Para o posicionamento da obra longitudinal aderente, optou-se pela na zona de maior erosão a sotamar do quebramar, atuando desta forma também como forma de fixar da linha de costa dessa zona erodida. Quanto à inclinação da mesma, utilizou-se uma estrutura com um V/H de $2/3$.

Relativamente às dimensões das estruturas, optou-se por ter uma solução final com características homogêneas, onde o comprimento é igual nas duas estruturas (100, 200 e 400m). A Figura 4.14 apresenta os resultados obtidos.

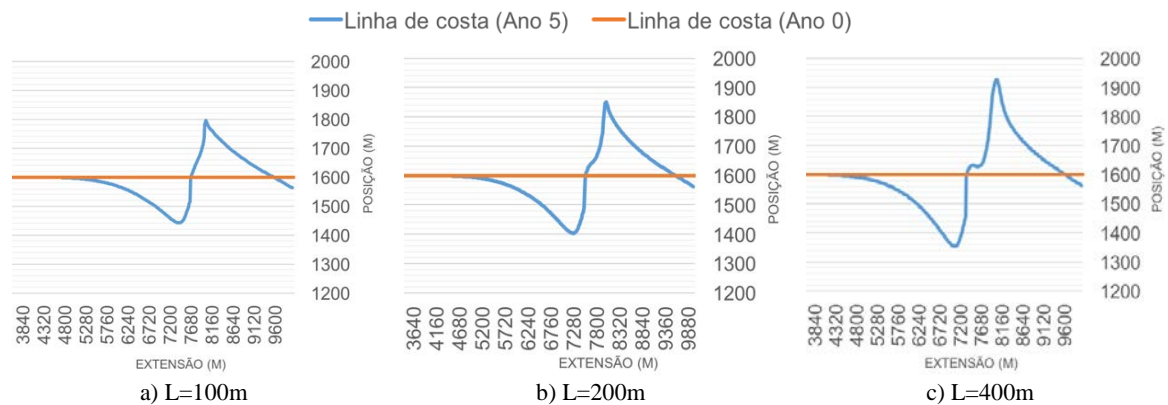


Figura 4.14 - Posição da linha de costa nos cenários que conjugam um quebramar destacado ($d=410m$ e $K_t=0.48$) e uma obra longitudinal aderente de comprimento L igual

Da observação dos gráficos da Figura 4.14, constata-se que a linha de costa ao fim de 5 anos mantém-se no eixo 7600m, local de implementação da obra longitudinal aderente. Com o aumento das dimensões das estruturas aumentam de forma proporcional as áreas A_2 e A_3 . O pequeno assoreamento verificado na obra longitudinal aderente, quando em solução isolada e no eixo de 9000m, volta-se a verificar neste caso, onde o comportamento da formação do tómbolo do quebramar é afetado por esse fator, com tendência a se evidenciar cada vez mais, como é possível ver a sua maior evidência no eixo 7600 da Figura 4.14c. Relativamente ao afastamento Y_g , esta distância aumentou na solução mista comparativamente com o cenário de referência L.3.1 apenas com um quebramar, sendo maior com o aumento do comprimento da estrutura, visível na Figura 4.15.

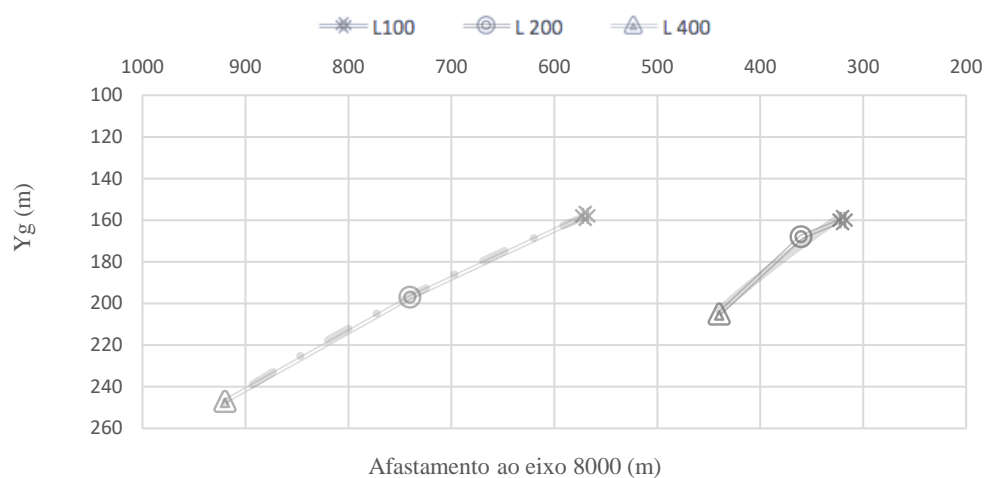


Figura 4.15 – Posição mais recuada da linha de costa (Y_g) para o caso L.3.1 (linha contínua) e para a solução mista (linha a tracejado), para os diferentes comprimentos de estrutura

Também se notou o efeito da solução mista na posição do ponto mais recuado da linha de costa, resultando praticamente no dobro do afastamento obtido no cenário de referência, sendo proporcional para os comprimentos da estrutura analisados (Figura 4.15). A influência da presença simultânea de ambas as estruturas também se fez sentir nas áreas de erosão e acreção associadas à sua implantação. A Figura 4.16 ilustra os resultados obtidos, quem função do material necessário (volume para as obras de 100m, 200m e 400m).

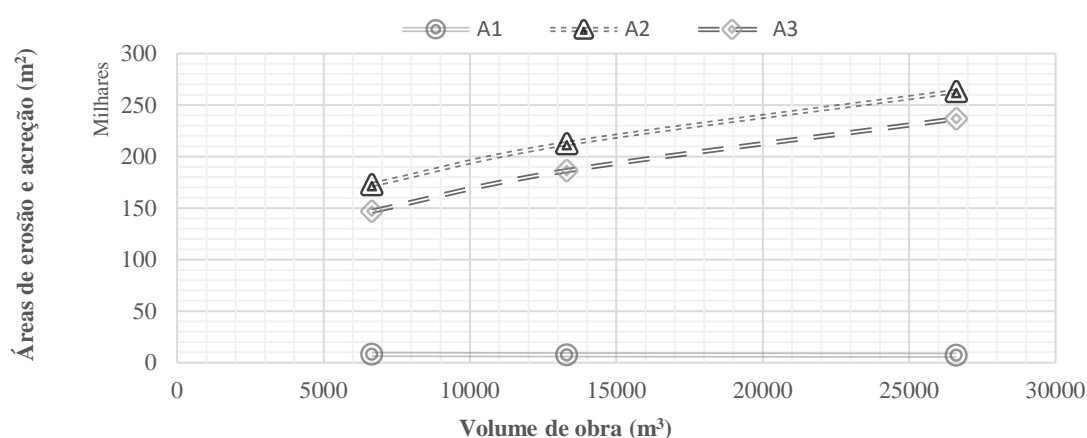


Figura 4.16 – Resposta da linha de costa (áreas) na presença das obras de defesa por volume de obra

O comportamento demonstrado associa os maiores volumes de obra a maiores áreas A_2 e A_3 , com uma evolução paralelas entre elas, sendo que a área de erosão A_2 sempre superior. Num contexto geral verificou-se que a solução mista com os comprimentos das estruturas a 100m apresenta melhores resultados que o cenário de referência com um quebramar, com $L=200m$. A 5 anos, a solução mista apresenta um menor recuo máximo Y_g em 10m, áreas de erosão e acreção mais pequenas e consequentemente uma menor perda relativamente ao cenário de praia sem obra, com 40.5% em vez de 41% de *cenário 2.3.1*.

4.4.2 Dois quebramares destacados submersos

Outra análise que se considerou importante foi o teste de um cenário com mais do que um quebramar. Para tal utilizou-se mais uma vez como cenário de referência o *cenário 2.3.1*. A implementação do segundo quebramar dependeu das dimensões consideradas para o teste. Como apenas se analisou o comprimento de 200m, e se teve como premissa que o

afastamento entre as estruturas (L_g) seria de $2L$, o eixo de implementação definido para o segundo quebramar foi 7400m. Na Figura 4.17 ilustra-se a comparação dos resultados obtidos entre o cenário agora analisado e o *cenário 2.3.1*.

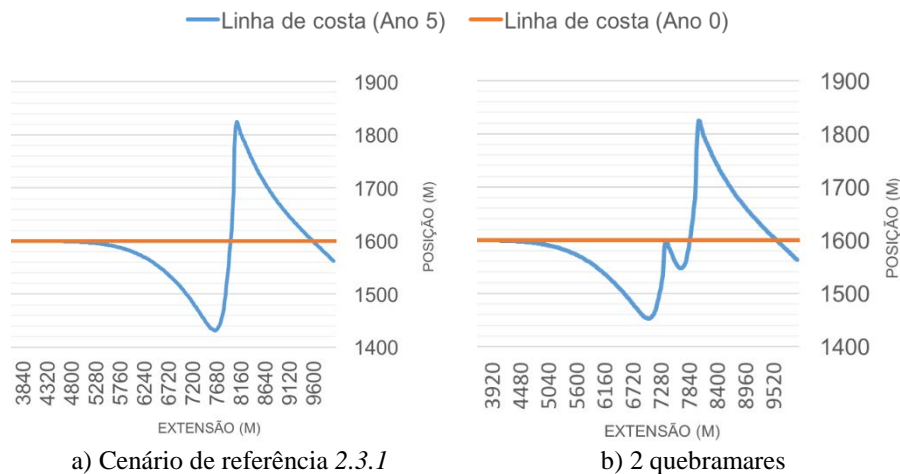


Figura 4.17 – Posição da linha de costa no cenário 2.3.1 e para o cenário com 2 quebramares destacados

O comportamento da linha de costa demonstrado com os dois quebramares destacados apresenta variações de maior relevo na zona A_2 , com as zonas A_1 e A_3 a permanecerem relativamente iguais quando comparadas com o cenário de apenas um quebramar (Figura 4.17). Verifica-se um recuo menor da zona A_2 , com um Y_g a passar dos 168m para 147m, recuando menos 21m em 5 anos. Este comportamento poderá representar uma tendência de aumento para maiores comprimentos da estrutura, já que com a presença do segundo quebramar existe uma zona de formação do tómbolo atrás dessa segunda estrutura. A Figura 4.18 associa os volumes de material necessário dos cenários 2.3.1 e dos dois quebramares destacados.

Num balanço geral, a solução com dois quebramares apresenta melhorias no comportamento em planta, passando de uma situação de perda (cenário 2.1.3 comparativamente com o cenário de praia sem obras) para um ganho relativo de 86%, já que a área total perdida é de $-3\,274\text{m}^2$, devido ao menor desenvolvimento da área de erosão A_2 mas com a utilização do dobro do material (Figura 4.18).

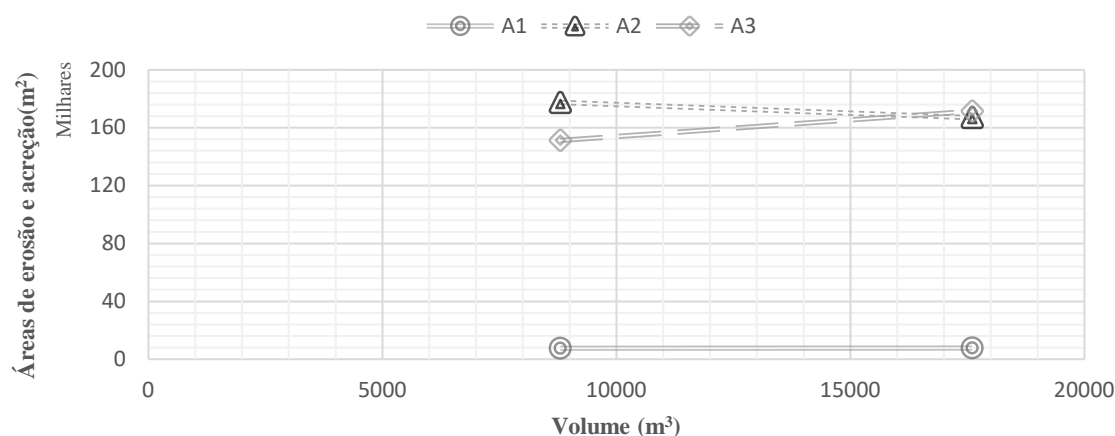


Figura 4.18 – Áreas e erosão (A_1 e A_2) e acreção (A_3) por volume total de obra

4.4.3 Cenário com condições fronteiras estáveis

A análise ao comportamento em planta da linha de costa associado à construção de estruturas de defesa costeira teve como uma das considerações iniciais a fronteira móvel do lado direito do modelo, com a velocidade de recuo da linha de costa nessa zona de 0.02m/dia, o que provocara a erosão verificada no cenário de referência.

No presente subcapítulo estuda-se a sensibilidade deste parâmetro e a diferença de resposta costeira à presença de um quebramar destacado numa linha de costa que não se encontra em erosão (fronteiras fixas), percebendo dessa maneira qual o comportamento efetivamente provocado pela estrutura de defesa costeira. A Figura 4.19 representa a posição da linha de costa ao fim de 5 anos. Neste cenário evidencia-se o desaparecimento da área de erosão A_1 . Esta área estava diretamente relacionada com a erosão que se faria sentir sem estrutura, por efeito das condições fronteira impostas. O Y_g não varia substancialmente, verificando-se um pequeno aumento de 1m no caso que aqui se analisa. As consequências impostas pela estrutura, que se refletem nas áreas A_2 e A_3 , verificam-se proporcionais, onde a área de acreção formada pelo tómbolo (A_3) iguala a área de erosão a sotamar (A_2). Desta forma percebe-se que, a perda relativa que se verifica nos cenários modelados para o quebramar isolado está relacionada com a existência de erosão na área de estudo.

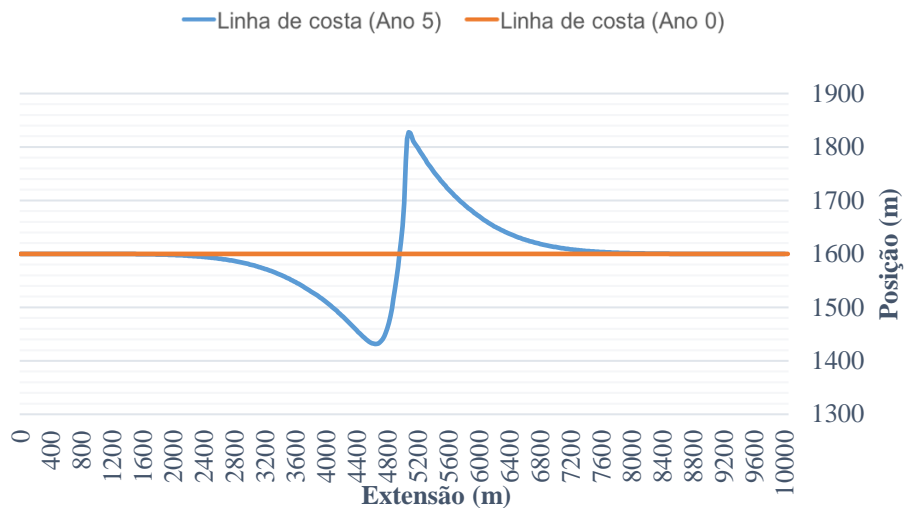
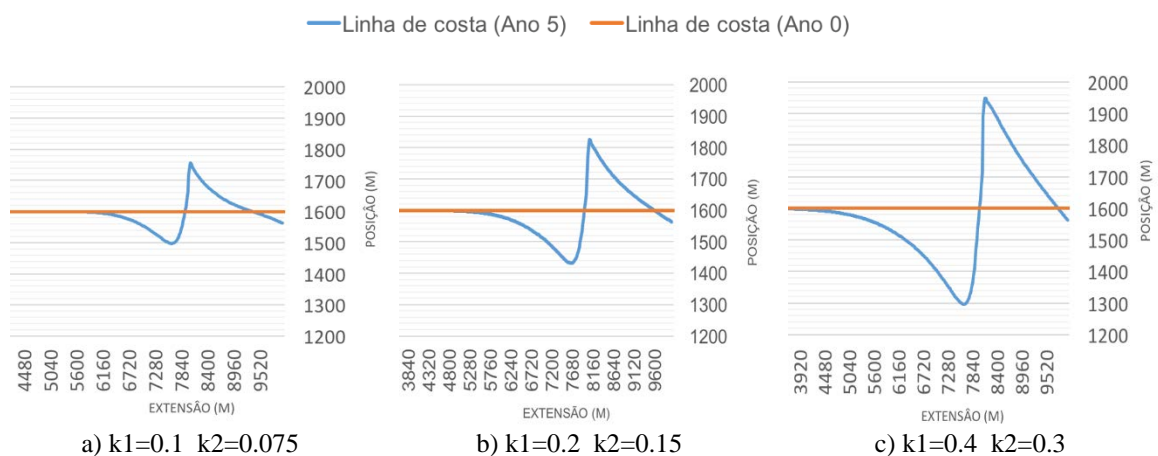


Figura 4.19 – Posição da linha de costa para o cenário 2.3.1 com fronteiras fixas

4.4.4 Coeficientes de transporte sedimentar

Percebendo com o subcapítulo anterior que a erosão nos cenários modelados faz toda a diferença no comportamento associado às estruturas de defesa costeira surgiu a necessidade de testar a sensibilidade dos coeficientes de transporte sedimentar introduzidos nas formulações da modelação numérica de estimativa do transporte sólido. Como referido, os valores adotados nos cenários apresentados até aqui foram 0.2 para o K_1 e 0.15 para o K_2 . Para efetivamente conhecer o peso destes parâmetros no resultado final fizeram-se dois tipos de modelações: uma com os coeficientes a metade e outra com estes a assumirem o dobro dos valores iniciais. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figura 4.20 e 4.21.

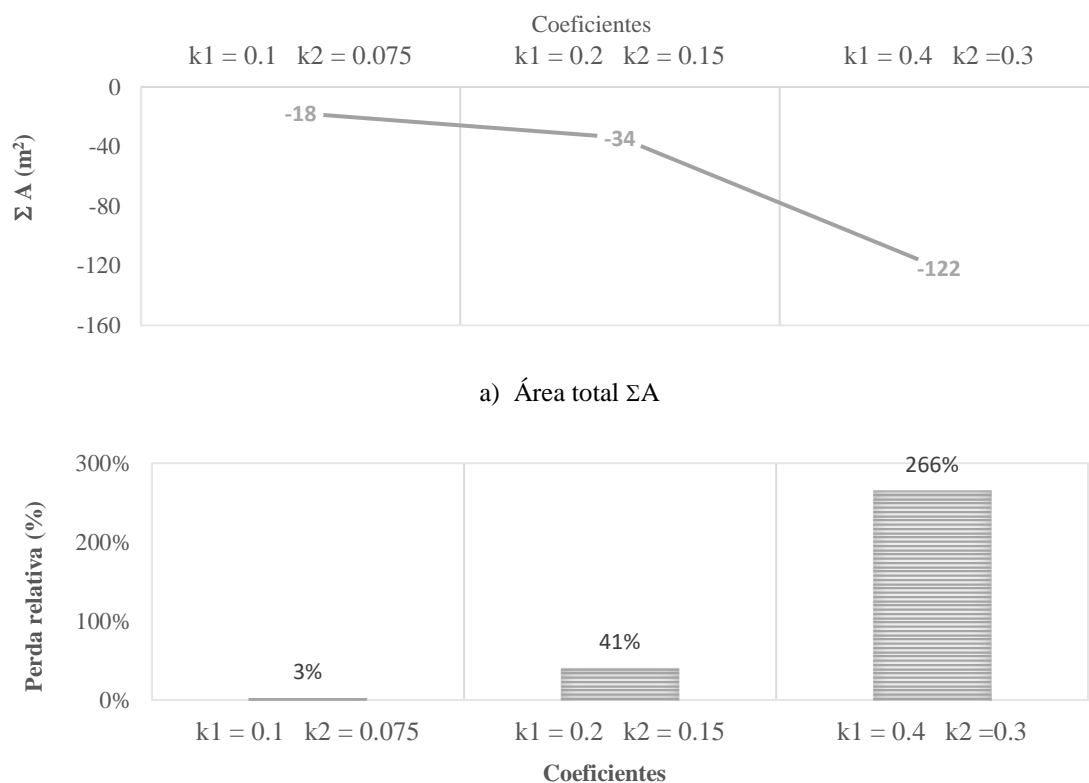


a) $k_1=0.1$ $k_2=0.075$

b) $k_1=0.2$ $k_2=0.15$

c) $k_1=0.4$ $k_2=0.3$

Figura 4.20 – Posição da linha de costa para diferentes coeficientes de transporte sedimentar



b) Balanço dos cenários comparando com o cenário de referência
 Figura 4.21 – Resultados obtidos da modelação com diferentes coeficientes de transporte sedimentar

Existe uma variação acentuada das áreas de erosão e acreção verificada com as alterações analisadas, constatando-se que há mais erosão quanto maior forem os valores assumidos para os coeficientes de transporte sedimentar. Fez-se a comparação dos cenários elaborados agora simulados com a mesma situação de coeficientes, mas sem obra. Dos resultados obtidos na Figura 4.21b evidencia-se a variação mais acentuada entre coeficientes, com os coeficientes a $k_1=0.1$ e $k_2=0.075$ a registarem valores de perda relativa baixos. Já os coeficientes $k_1=0.3$ e $k_2=0.4$ assumem uma perda relativa bastante maior, na ordem dos 266%.

Os resultados obtidos fazem notar a importância que os coeficientes de transporte sedimentar assumem dentro da análise do comportamento em planta, evidenciando que se a capacidade de transporte sedimentar for superior, a evolução da linha de costa é mais rápida e ao fim de 5 anos de simulação os impactos nas áreas de erosão e acreção são superiores.

4.4.5 Horizonte temporal da simulação: 10 anos

Analizou-se por último o horizonte temporal das simulações, alargando o período temporal de análise de 5 para 10 anos. Utilizou-se mais uma vez o *cenário 2.3.1*, avaliando progressivamente os resultados ao fim de cada ano de simulação. A Figura 4.22 apresenta os resultados do comportamento da linha de costa para esse período.

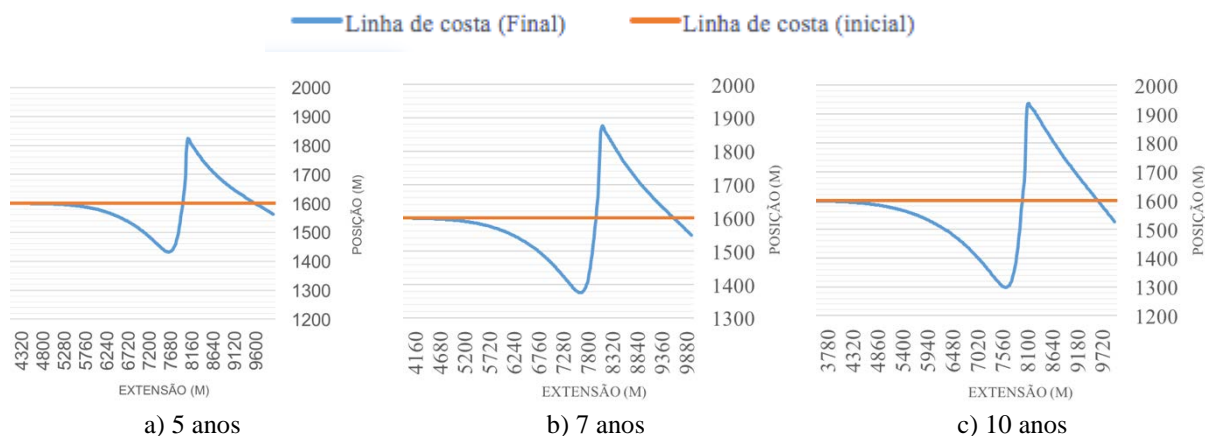


Figura 4.22 – Evolução da linha de costa ao longo do tempo para o cenário 2.3.1

Entende-se que existe uma evolução do comportamento registado a 5 anos, aumentando as áreas de erosão e acreção A_2 e A_3 . Verifica-se também um consequente aumento da extensão da linha de costa afetada pela área A_2 , com uma diferença de 960m entre os 5 e os 10 anos. Já relativamente aos pontos mais afastados, tanto em extensão como no afastamento à linha de costa verifica-se que os valores do ponto mais afastado do tómbolo são sempre superiores aos do Y_g (Figura 4.23).

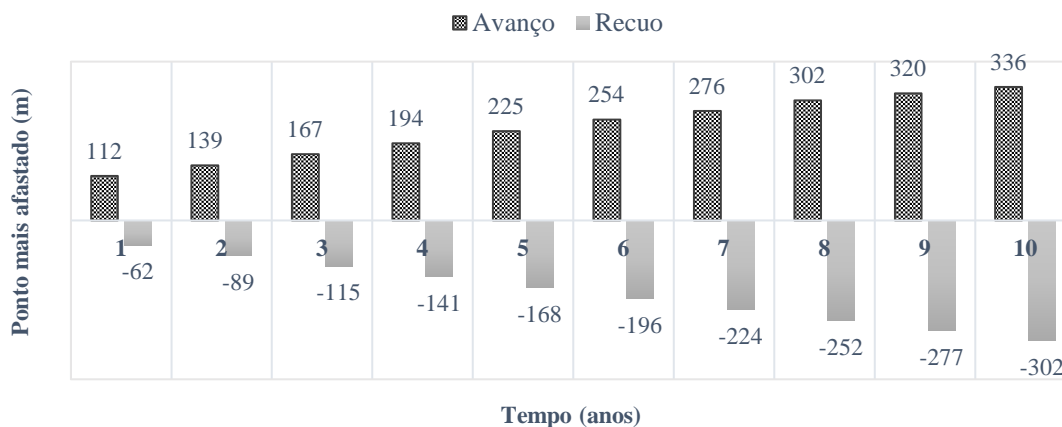


Figura 4.23 – Avanço e recuo máximo registado em cada ano de modelação.

Embora o ponto mais afastado de avanço seja sempre superior ao mais recuado, a área associada à zona de erosão revela-se superior à área assoreada do tómbolo, registrando sempre um ΣA anual negativo. Nas considerações iniciais, foi simulada uma corrida a 10 anos da praia natural, permitindo a comparação ao longo dos anos com o cenário de referência. Num cômputo geral, verificou-se que a obra apenas introduz um balanço positivo (acrecção) até ao segundo ano de simulação. Na Figura 4.24 ilustra-se o gráfico com o comportamento anual, sendo representada a diferença de área perdidas entre o cenário com quebramar destacado e o cenário sem obras.

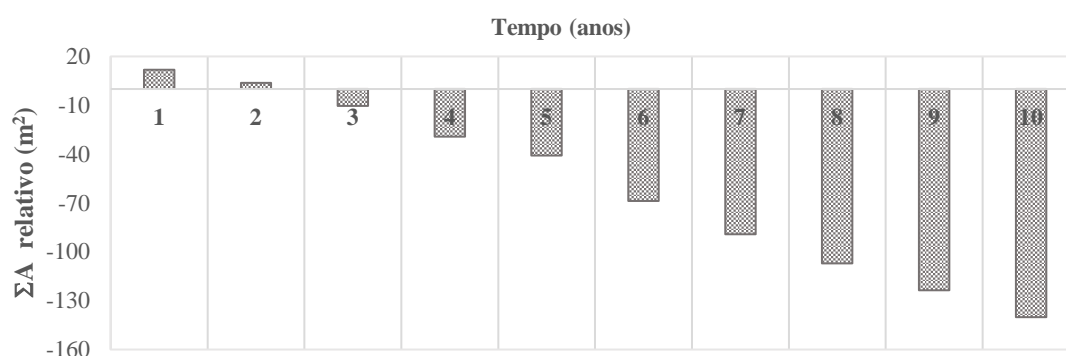
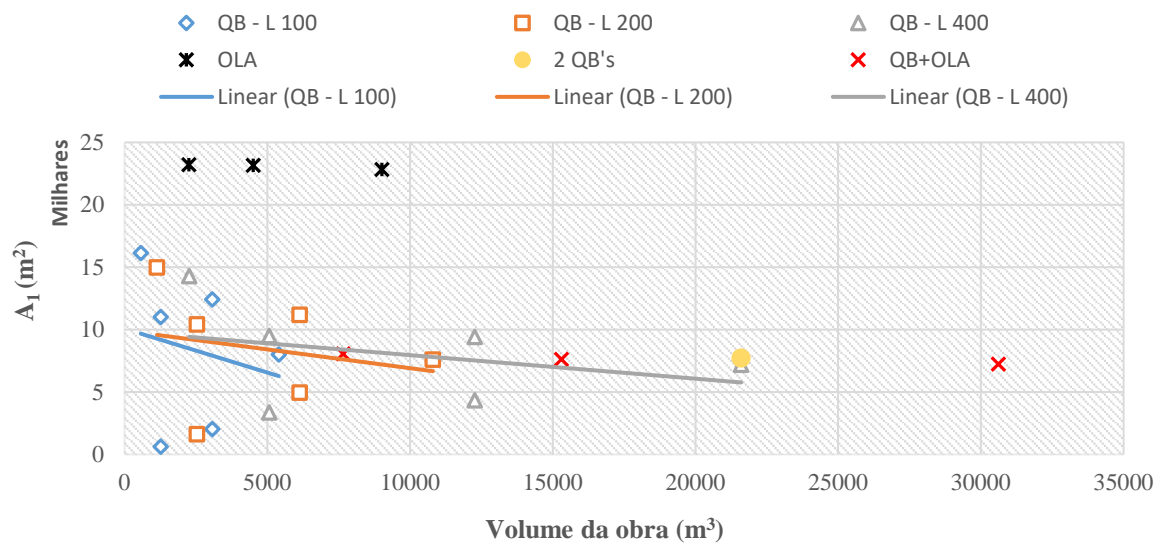


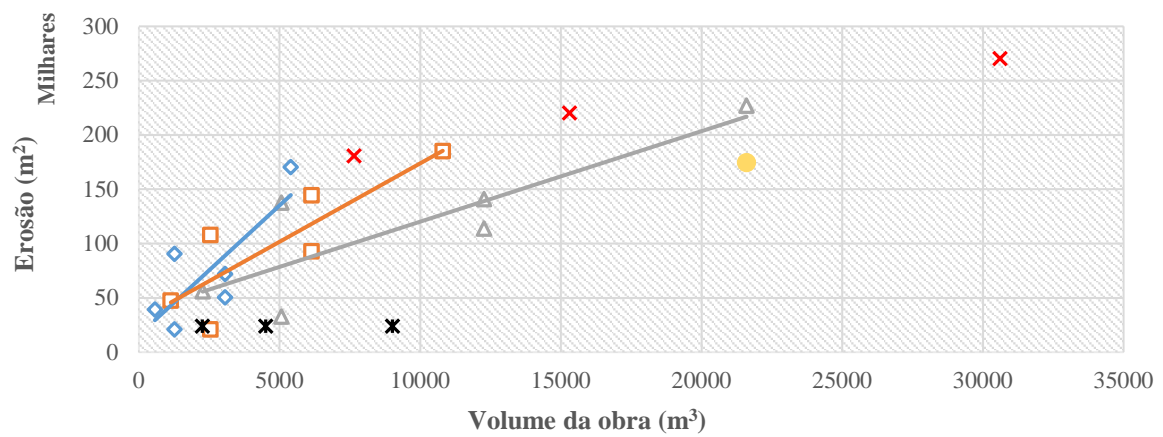
Figura 4.24 – Balanço da perda/ganho anual a 10 anos em comparação com cenário de praia sem obras

4.5 Comparação das Soluções

Depois das análises de sensibilidade realizadas para cada parâmetro das obras longitudinais aderentes e dos quebramares destacados submersos, trataram-se os resultados obtidos. Dentro da análise em planta procurou-se fazer uma comparação que tornasse compatível as análises com obra analisadas. Desta forma, relacionaram-se as diferentes áreas de erosão e acreção com o volume da estrutura que as origina. Obtiveram-se os gráficos presentes nas Figura 4.25 e Figura 4.26.

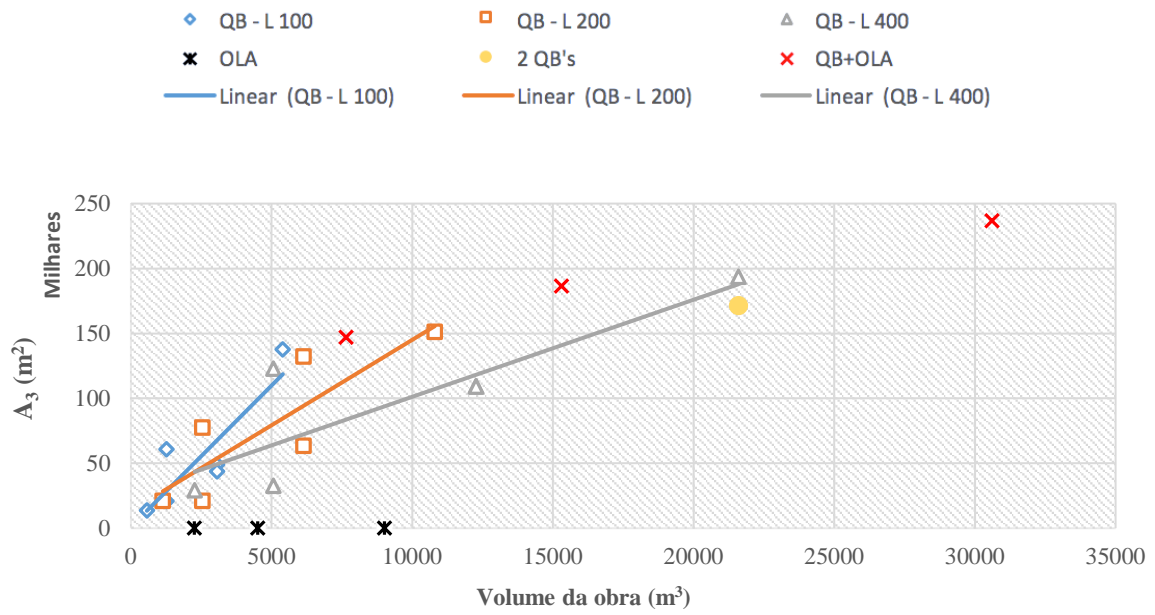


a) Área de erosão A_1

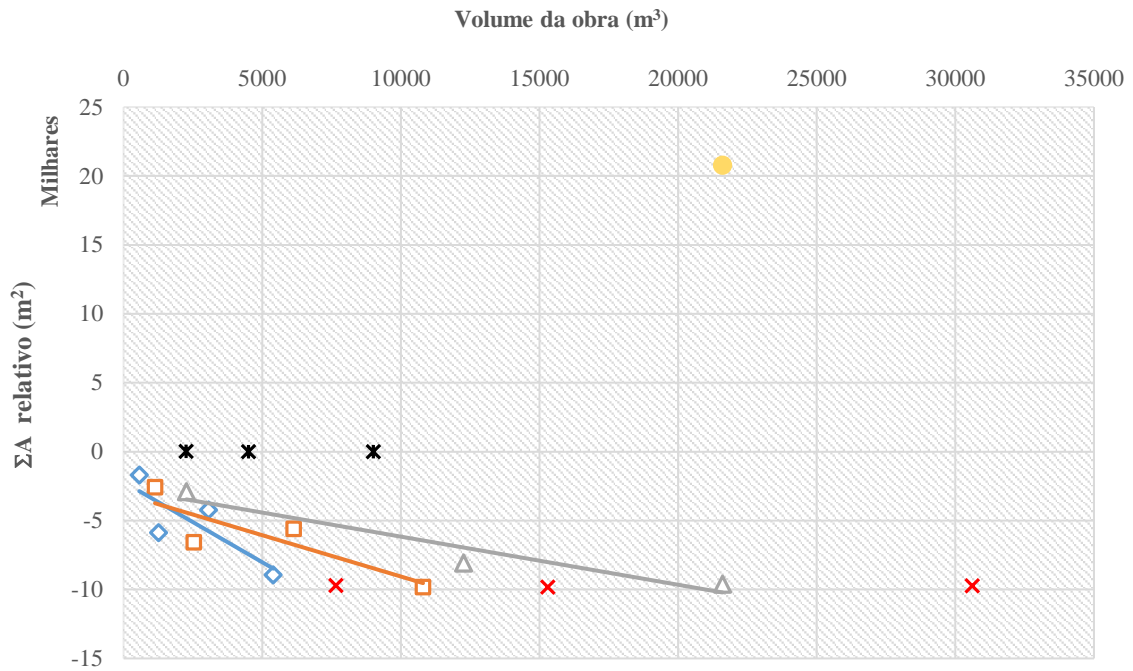


b) Áreas de erosão A_1 e A_2

Figura 4.25 – Relação entre as áreas de erosão e o volume das estruturas de defesa costeira utilizadas



a) Área de acreção A_3



b) Diferença entre o cenário sem obras e ΣA (m^2) de cada solução

Figura 4.26 – Relação entre as áreas de alteradas da linha de costa a 5 anos e o volume das estruturas de defesa costeira utilizadas

Na comparação direta das soluções analisadas torna-se perceptível o comportamento obtido das diferentes estruturas com o aumento do seu comprimento e consequentemente aumento quantidades de material. Nos gráficos da Figura 4.25a, 4.25b e 4.26a realça-se que todas as obras longitudinais aderentes demonstram um comportamento díspar das restantes soluções.

As obras longitudinais aderentes representam, para qualquer que seja o comprimento da estrutura associado às mesmas, a maior área de erosão A_1 das soluções analisadas. As restantes soluções apresentam uma tendência de diminuição da área de erosão A_1 com o aumento dos volumes das estruturas, verificando-se uma homogeneização de valores $> 300\text{m}^2$ em estruturas volumosas.

Relativamente ao somatório das zonas em erosão A_1 e A_2 , as obras longitudinais aderentes assumem-se como a solução menos desestabilizadora. Verifica-se também que a solução mista apresenta os valores mais elevados de erosão para os seus volumes de obra. Nos quebramares destacados o *cenário 3.3.3* tem uma boa relação entre a pouca erosão provocada e o volume necessário, erodindo 30mil m^2 , cerca de metade de soluções com volumes idênticos.

A formação do tómbolo acompanha o comportamento registado anteriormente, pois maiores volumes de obra estão associados a maiores áreas de acreção. As obras longitudinais aderentes não registam acreção substancial. É a solução mista também a que representa maior valores relativamente aquilo que são os volumes de obra em relação ao tómbolo formado. Com um forte impacto na acreção surge também a solução com dois quebramares destacados, associando um grande volume a 170mil m^2 de tómbolo.

Num balanço final, onde se relacionam as soluções analisadas com a erosão inicialmente registada no cenário de referência, entende-se que a solução com dois quebramares é a mais eficiente num contexto em planta, pois foi a única solução que assegurou que a zona em acreção fosse superior às zonas em erosão, representando um ganho em relação ao que seria a erosão no cenário de referência inicialmente verificado. Assegurando a mesma extensão de fixação da linha de costa, 400m , a obra longitudinal aderente representa a mesma erosão que o cenário de referência só que utilizando menos material de obra, cerca de metade, o que torna esta solução competitiva com a anterior. Outra opção que se revelou interessante na

análise é o *cenário 3.3.3*, que representa pouco material utilizado em obra para proteção dos 400m, mas assumindo uma erosão cerca de 12% superior ao cenário de referência, em 5 anos.

De referir que as soluções que resultaram dos cenários adicionais têm por base aquele que foi o pior cenário verificado para os quebramares destacados. Assim os resultados associados a essas soluções tendo por base outro cenário de referência melhorariam os valores finais.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo corresponde a um sumário de todo o trabalho desenvolvido, destacando as principais conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.

O combate à erosão e aos galgamentos com estruturas de defesa costeira é uma opção que há muito se implementa nas zonas costeiras, tanto em contexto internacional como nacional. Contudo, o registo de casos em que com a resolução de um problema se antecipam outros problemas é comum. Não são conhecidas soluções sem aspetos negativos pelo que se torna necessário possuir um conhecimento o mais lato possível da eficácia de cada opção de intervenção e da resposta da linha de costa na sua presença. Assim foi objetivo deste trabalho analisar a eficácia transversal das estruturas e o comportamento em planta associada a cada uma delas, onde se focaram as soluções com quebramares destacados submersos e obras longitudinais aderentes. Para tal, efetuaram-se análises de sensibilidade relevantes na singularidade de cada solução, alterando as características intervenientes nos cálculos efetuados.

5.1 Síntese de Resultados

Constatou-se com o tempo que era necessário realizar construções que contivessem e/ou dissipassem a energia proveniente dos oceanos e diminuíssem o problema da erosão existentes nas praias naturais. Mas, as ações antropogénicas de defesa costeira para além do seu efeito benéfico pelo qual são construídas, constituem em paralelo, um problema no sistema costeiro, que após a sua construção ficam menos equilibrados. Este desequilíbrio varia consoante o tipo de estrutura implementada, onde a linha de costa, de forma a se adaptar ao novo elemento rígido, sofre variações notáveis, agravando em muitos dos casos a erosão a sotamar.

Para a análise à mitigação de galgamentos e à variação imposta na linha de costa estudaram-se as obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados devido às suas características. As obras longitudinais aderentes normalmente são implementadas em situações de emergência em zonas seriamente atacadas pelo mar, tendo como função primordial a retenção do talude que protege e a resistência à ação direta da agitação. Já os quebramares destacados são estruturas geralmente utilizadas como obras de proteção.

Geralmente são aplicados em condições de agitação média ou calma, podendo ser projetados modelos emersos ou submersos, paralelos ou enviesados em relação à linha de costa.

O estudo do comportamento das soluções rígidas adotadas dividiu-se em dois capítulos abrangentes, os capítulos 3 e 4, onde se elaborou a análise às estruturas num contexto transversal e em planta, respetivamente. A abordagem inicial passou por registar o espraçamento máximo esperado numa praia sem qualquer intervenção antropogénica. Para a estimativa de espraçamento máximo, tanto para a situação com e sem obras, partiu-se do estudo de Teixeira (2014) e consideraram-se as formulações empíricas simplificadas aplicáveis a praias naturais e a estruturas costeiras com mantos resistentes inclinados, baseadas em diversas propostas de cálculo existentes na literatura.

Nas obras longitudinais aderentes analisaram-se 4 inclinações de talude, mantendo a espessura da estrutura no estudo transversal. O espraçamento registado assinala que o rendimento da estrutura, quando comparado com o espraçamento obtido no cenário de referência em semelhante agitação marítima, depende apenas da inclinação. Verificou-se que com o aumento da inclinação adotada se reduz o rendimento da obra, onde apenas se apresentam rentáveis as inclinações $1/3$ e $1/2$ (V/H), com reduções da altura de espraçamento comparativamente com o cenário de referência de 41% e 11%, respetivamente. Desta forma, o aumento da inclinação do talude representa uma menor área transversal, mas também um menor rendimento da estrutura, existindo assim uma relação direta entre a perda de rendimento para menores quantidades de materiais necessário.

Elaborou-se também uma análise em que se aumenta a cota de coroamento da estrutura até à altura mínima necessária para colmatar os galgamentos registados. Verificou-se que o período associado às ondas incidentes tem relevo no estudo realizado, onde para diferentes períodos resultaram diferentes melhores soluções. Para períodos pequenos a solução que se apresenta como mais rentável é a inclinação $1/2$ (V/H), que é a que necessita de uma menor área transversal para mitigar quaisquer galgamentos, mitigando até onda de 12m com uma área transversal de 44m^2 . Para períodos médios existem duas melhores soluções, uma até à altura de onda 7m com 41m^2 e assumindo uma inclinação de $1/2$ (V/H), onde a partir desta passa a ser a inclinação $1/3$ (V/H) a mais rentável, que mitiga a existência de galgamentos até onda com 12m com 48m^2 de área transversal. Para períodos superiores, as a inclinação

1/3 (V/H) para a mesma agitação incidente necessita de 63m^2 . Assumindo um período médio com um cenário de agitação médio, a inclinação 1/2 (V/H) apresenta melhores valores para que não existam quaisquer galgamentos. Se forem cenários de climas de agitação mais energéticos, a inclinação 1/3 (V/H) é a mais rentável.

Nos quebramares destacados submersos, para ser estimado o espraçamento na presença da obra é necessário calcular inicialmente o coeficiente de transmissão da estrutura, estimando depois a onda transmitida e, por fim, calcular o espraçamento máximo, utilizando o mesmo procedimento de cálculo da praia natural. Comparam-se 7 formulações no âmbito do cálculo do coeficiente de transmissão, optando-se pela proposta de cálculo avançada por Goda *et al.* (1967), com valores obtidos entre 0.47 e 0.87, dependendo da altura de onda incidente e da cota de coroamento do quebramar, maioritariamente.

Na análise de sensibilidade realizada em cada formulação conclui-se também que, dentro do contexto de agitação simulado a massa média para o manto resistente é o parâmetro que menos variações representa no resultado final do coeficiente de transmissão, independentemente da formulação utilizada. Relativamente à largura de coroamento, entende-se que com o aumento deste parâmetro diminui a transmissão da onda, mas revela-se pouco influente acima dos 10m. A inclinação dos taludes da estrutura, que se consideram iguais dos dois extremos transversais, é um fator onde se obteve diferenças relevantes, onde os melhores resultados estão associados a menores inclinações. A altura de coroamento é o parâmetro que se revela mais diferenciador nos resultados obtidos, com maiores coeficientes de transmissão para menores estruturas, sentindo-se menos a diferença da altura das estruturas com o aumento da onda incidente.

Resultante da continuação da análise transversal ao comportamento dos quebramares destacados submersos, estimou-se o espraçamento obtido da agitação transmitida pelas diferentes estruturas, mediante utilização da formulação de Teixeira (2014) para praias sem obras (no areal). Com a presença do quebramar destacado submerso não foram totalmente mitigados os galgamentos, pois em todos os cenários analisados se registam galgamentos a partir de uma certa altura de onda.

Quando se comparam os resultados obtidos em análise com os do cenário de referência, percebe-se que o rendimento da estrutura é sempre positivo para qualquer dimensão, ou seja, existe sempre uma redução da altura de espraçamento com a implementação da obra, cenário que não se verifica nas obras longitudinais aderentes para todas as inclinações, como constatado. Num plano geral constatou-se que a maior eficácia e o maior ganho percentual pertencem a cotas de coroamento superiores, que correspondem a maiores alturas de estruturas, como também a maiores gastos de material. O ganho em relação à praia natural aumenta para ondas de maior altura, onde para ondas superiores a 10m o ganho se encontra entre os 20 e 35%, dependendo do R_c . Para as alturas de onda 4, 5 e 6m o R_c revela-se mais importante nos resultados, onde as diferenças de resposta são ligeiramente superiores, entre alturas de coroamento.

Em resumo, comparando as duas soluções verifica-se que as obras longitudinais aderentes revelam à partida uma maior altura galgada que aumenta para soluções com maior inclinação. Apenas as soluções $1/3 (V/H)$ e $1/2 (V/H)$ se apresentam com os valores próximos dos obtidos nos quebramares destacados. Dos resultados obtidos entende-se uma maior eficácia dos quebramares destacados submersos dentro daquilo que foram o número total de mitigação de galgamentos para a mesma agitação. As duas estruturas associam uma maior área transversal para uma melhor resposta, mas os quebramares destacam-se com valores numa maior gama de áreas transversais. Ao comparar o comportamento das estruturas na relação altura galgada e área transversal necessária entende-se que existe uma gama de valores de áreas transversal que representam o limite em que cada solução é melhor. Abaixo dos 33m^2 os quebramares destacados submersos representam a melhor solução, onde com as mesmas áreas transversais se obtém menores valores da altura galgada. Acima dos 39m^2 as obras longitudinais aderentes asseguram mais eficácia na redução do espraçamento. Entre estes valores encontra-se uma janela comportamental, em que a melhor solução depende da curva obtida.

Constatou-se que, ao relacionar as áreas das diferentes secções transversais das estruturas que eliminam os galgamentos na sua totalidade com o aumento da altura de onda incidente, a melhor opção estrutural para ondas mais energéticas não é a mesma que para ondas intermédias. Este comportamento também é verificado para o período de onda, já que para

períodos de onda menores a melhor solução no comportamento transversal é em geral o quebramar destacado submerso, e para períodos de onda superiores já depende bastante da altura da onda incidente. As obras longitudinais aderentes surgem como melhor solução para períodos altos em toda a gama de alturas de onda. Caso se altere a inclinação do talude da obra longitudinal aderente para $2/3$ (V/H), os quebramares destacados são os mais eficazes em períodos pequenos e nos médios até ondas de 7m, onde a partir daí e para períodos de onda superiores um cenário com ambas as estruturas se assume como mais eficaz. Verificou-se também que, o padrão de aumento das estruturas não favorece inclinações de talude superiores, já que aumenta em grande parte a área transversal necessária para mitigar completamente os galgamentos e estas soluções têm alturas de galgamento associadas bastante superiores comparativamente às inclinações menores.

Após a análise transversal efetuou-se a análise em planta. Nesta pretendeu-se medir o impacto diretamente relacionado com a introdução das estruturas num sistema costeiro, medindo áreas de erosão e acreção num decorrer temporal de 5 anos. A modelação teve por base o GENESIS, onde se modelaram uma variedade de cenários com as duas obras visadas. Inicialmente modelou-se o cenário sem obras, cenário de referência, onde se obteve uma erosão de 24 051m².

Para a inserção das estruturas, o primeiro fator de decisão relacionou-se com o eixo de implementação da estrutura, diretamente relacionado com a variação da posição da linha de costa resultante da construção da estrutura. O aumento do afastamento da estrutura ao local de maior erosão inicialmente verificada revela uma menor tendência para a variação da posição da linha de costa e uma menor perda da zona A_2 com o implícito aumento da zona A_1 . A resposta da linha de costa ao aumento do comprimento das estruturas também é afetada pela localização escolhida, pois se as obras são implementadas em zonas de menor erosão são também menos afetadas pela dimensão da estrutura. Assim, esta distância afeta o comportamento esperado da linha de costa, pois para maiores afastamentos à zona de erosão haverá menores recuos a sotamar da estrutura, mas perde-se a fixação da linha de costa em zonas de maior intensidade de erosão.

O comportamento em planta das obras longitudinais aderentes não apresenta diferenças consideráveis comparativamente com aquilo que foi a resposta da linha de costa no cenário de referência.

No estudo em planta referente aos quebramares destacados submersos analisou-se a importância de fatores como o comprimento da estrutura (L), o afastamento à linha de costa inicial (d) e o coeficiente de transmissão (K_t). Devido ao comportamento registado na linha de costa com a implementação dos quebramares, onde surgem 3 zonas de alteração costeira, um dos parâmetros de avaliação desta solução foi também o recuo máximo provocado a sotamar.

Os resultados indicam que, com o aumento do comprimento da estrutura existe um proporcional aumento da área do tómbolo, bem como da distância Y_g , com efeito direto nas áreas A_3 e A_2 , respetivamente. A zona A_1 tende a não ser afetada pela extensão do quebramar. A maior distância da estrutura à linha de costa transmite um menor impacto na resposta da linha de costa, provocando uma pequena diminuição das áreas de erosão e acreção. A variação do coeficiente de transmissão, K_t , tem uma influência significativa na posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação. Constatou-se sobretudo que, para valores de K_t mais baixos o aumento do comprimento da estrutura associa-se a um mais rápido assoreamento, enquanto para valores intermédios a resposta é oposta. Mesmo com o aparente aumento de área associado a maiores comprimentos, para um determinado K_t , torna-se difícil ler resultados pois a mesma distância à linha de costa pesa de maneira diferente para diferentes comprimentos.

Dentro do mesmo K_t , para valores superiores na relação L/d , resultam maiores variações na linha de costa. Verificou-se também que, com a diminuição do K_t maior propensão existe para o aumento das áreas de alteração da linha de costa, para o mesmo valor de L/d . A mesma tendência se verifica no recuo máximo obtido em cada cenário. A proporção $L/d=0.8$ representa as melhores soluções obtidas, com cenários nos diferentes coeficientes de transmissão avaliados acima da média traçada para cada um deles. Assim, as soluções com uma distância à costa 25% superior em relação ao comprimento da estrutura revelam um menor impacto negativo.

O balanço entre áreas de erosão e acreção em quebramares destacados submersos é maioritariamente negativo, quando comparados os valores obtidos entre áreas de cada cenário e os 24 051m² que se perderiam sem obra. Registaram-se perdas entre o cenário inicial e os cenários que se apresentam com obra de defesa entre os 5% a 41%, dependendo das características físicas de implementação. Os registos que apresentaram como mais rentáveis correspondem a um coeficiente de transmissão maior, concluindo-se assim que os coeficientes de transmissão mais pequenos representam um impacto como estão associados a alturas de obras maiores, que representam um impacto mais negativo na linha de costa. Mas os cenários mais negativos têm em comum a junção de um coeficiente de transmissão pequeno, e por consequente uma maior altura das estruturas submersas, com um maior afastamento, concluindo-se que estruturas de maior coroamento e com um maior afastamento à costa representam maiores erosões. As combinações que apresentam ganho são apenas as que não concluíram os 5 anos de simulação devido à formação completa do tômbolo. Os casos registados foram 8, e em todos eles o comprimento da estrutura é superior à distancia à linha de costa. Desta forma entende-se que esta proporção não deve assumir valores muito desproporcionais, já que associada a coeficientes de transmissão menos permissivos se geram zonas de acreção num curto espaço de tempo.

De forma a ter uma análise mais completa, foram ainda analisados os cenários que conjugam um quebramar destacado e uma obra longitudinal aderente, dois quebramares destacados, um quebramar destacado numa zona costeira em equilíbrio, alteração dos coeficientes K_1 e K_2 associados transporte sedimentar e o alargamento do período temporal de corrida do modelo para 10 anos. Para elaboração das análises destes cenários adicionais utilizou-se o *cenário 2.3.1*, que registara o pior rendimento entre os restantes, com uma perda de areal relativa à praia sem obra de 41%.

Com a implantação da obra longitudinal aderente na zona de maior erosão registada no cenário de referência 2.3.1 obtiveram-se resultados diferentes de cada uma das soluções quando analisadas individualmente. Num contexto geral verificou-se que a solução mista com ambas as estruturas com $L=100m$ apresenta melhores resultados que o cenário de referência com um quebramar com $L=200m$, o que representa um menor volume de material necessário na solução mista, passando de 8800m³ para 6653m³. A 5 anos, a solução mista

apresenta também um menor recuo máximo Y_g em 10m, não representando grande alteração da erosão final obtida. Entende-se assim que esta solução seja viável, sobretudo com comprimentos e obra mais pequenos, dividindo a extensão protegida em duas zonas, onde a zona entre elas beneficia da formação do tómbolo.

Na análise com dois quebramares repetiram-se as considerações no cenário de referência, implantando-se o segundo quebramar ao dobro da distância do comprimento deles. Num balanço geral, a solução apresenta melhorias no comportamento em planta, passando de uma situação de perda relativa de 41% (cenário 2.1.3 comparativamente com o cenário de praia sem obras) para um ganho relativo de 86%, mas com o dobro do material gasto.

Realizaram-se ainda os casos de estudo relativos à análise de sensibilidade do tipo de fronteira (estável ou em erosão), dos coeficientes de transporte sedimentar e do período temporal da análise, onde em todos eles se obtiveram áreas diferentes de erosão e acreção da linha de costa, o que revela uma importância substancial na análise elaborada. Com a fronteira com condições fixas (estável) obteve-se exatamente a mesma área de acreção como de erosão. Desta forma percebe-se que, a perda relativa que se verifica nos cenários modelados para o quebramar destacado isolado está relacionada com a existência de erosão na área de estudo, e como anteriormente referido, a proximidade à zona em erosão.

Com a variação dos coeficientes de transporte sedimentar K_1 e K_2 constatou-se que o ΣA é mais negativo (maior erosão) quanto maior forem os valores assumidos para os coeficientes de transporte sedimentar. Evidencia-se assim que se a capacidade de transporte sedimentar for superior, a evolução da linha de costa é mais rápida, para o mesmo período temporal de simulação, onde os impactos nas áreas de erosão e acreção são superiores.

Por último, com o aumento do período temporal de análise percebe-se que mesmo existindo um maior avanço da acreção que da erosão anualmente verifica-se que o ΣA é sempre negativo devida a serem duas zonas em erosão. Registou-se também que a obra apenas introduz um balanço positivo (acreção) até ao segundo ano de simulação, onde com a evolução temporal se verifica uma perda de areal cada vez maior, entendendo-se assim um comportamento mais negativo na perda de areal com o passar do tempo.

Finalmente, e de forma a concluir a análise proposta em planta, comparam-se todas as soluções visadas relacionando as diferentes áreas de erosão e acreção com o volume de material da estrutura que as origina. A tendência verificada com o aumento do volume das estruturas depende da solução. No caso dos quebramares destacados atuando de forma isolada, com o aumento do volume utilizado regista-se um proporcional aumento da erosão. Um caso que se revelou interessante foi o *cenário 3.3.3*, que representa pouco material ($3\,267\text{m}^3$) utilizado uma estrutura de 400m, assume uma erosão cerca de 12% superior ao cenário de referência, em 5 anos, que não se considera elevada já que existem casos semelhantes a registar perdas de 40%. Já os casos que utilizem as obras longitudinais aderentes, isoladamente ou não, o que se verifica é um resultado constante com o aumento do volume da obra, resultante do aumento da extensão protegida. Entende-se que a solução com dois quebramares é a mais eficiente neste contexto, pois foi a única solução que assegurou que a zona em acreção fosse superior às zonas em erosão, representando um ganho em relação ao que seria a erosão na praia natural.

5.2 Conclusões

Numa visão geral dos conteúdos abordados na presente dissertação importa realçar certos conteúdos. Percebeu-se que as considerações iniciais assumidas podem interferir bastante no estudo do comportamento de obras de defesa costeira, tanto numa análise transversal como em planta. Fatores como os coeficientes de transporte, a condição fronteira e o período de onda são fatores que revelam essa importância no resultado final, influenciando mesmo a solução que se prevê como a mais rentável, dentro do contexto de estudo analisado.

Conclui-se que a nível transversal, mantendo a altura da estrutura fixa, quando menor for a inclinação das obras longitudinais aderentes melhor é a eficácia e o consequente rendimento da estrutura, devido à maior distância percorrida pela onda no processo de espraio. A eficácia dos quebramares destacados está diretamente relacionada com a profundidade de coroamento da estrutura, afetando o coeficiente de transmissão, onde com o aumento da profundidade de coroamento se perde eficácia e rendimento com a implantação da obra. Da comparação direta do rendimento das soluções analisadas transversalmente conclui-se que a solução que representa mais rentabilidade depende da área transversal utilizada, onde para

áreas transversais mais pequenas que 33m^2 os quebramares destacados submersos representam a melhor solução. As obras longitudinais aderentes apresentam-se mais rentáveis para valores acima dos 39m^2 . Entre estas duas áreas transversais a melhor solução depende da altura de onda incidente.

Em planta a solução de defesa costeira que menos afeta a linha de costa, mantém-se constante a partir dos 2 anos de modelação e é a obra longitudinal aderente, onde se obteve praticamente a mesma erosão que no cenário sem obra. Os quebramares destacados geram alteração da linha de costa de forma mais clara, onde para profundidades menores de coroamento se regista um mais rápido assoreamento e uma menor tendência de erosão. Conclui-se que as combinações que predefiniam o afastamento à linha de costa 25% superior que o comprimento da estrutura, resultaram em menores valores de erosão. Já os cenários que associam cotas de coroamento submersas altas e um maior afastamento à linha de costa resultaram em maiores áreas erodidas.

Na solução que conjuga os quebramares destacados e as obras longitudinais aderentes obtiveram-se menores áreas de erosão para estruturas mais pequenas. Esta solução com as estruturas com 100m de extensão cada, comparativamente com o quebramar destacado de 200m, representa menos 32% de material gasto com $7\,653\text{m}^3$ e obtendo-se praticamente a mesma área erodida o que torna a solução mista mais rentável. Para além desse facto, o conjunto das estruturas representa uma maior extensão de proteção da costa, devido à zona entre estruturas beneficiar da acumulação de areia e alargar a zona do tómbolo do quebramar até à frente da obra longitudinal aderente. Já a solução com dois quebramares destacados é a única que não representa um acréscimo de erosão com a própria construção, mas utilizando o dobro do material.

Na tentativa de responder à questão inicialmente levantada sobre qual é a solução mais rentável, que tenha uma boa resposta transversal e pouco impacto em planta, conclui-se que não existe uma solução completa em ambas as vertentes necessárias. O que se procura então é um cenário que reduza a altura de espraio e seja eficaz na mitigação de galgamento, que represente um bom rendimento com a sua construção e que se assuma rentável pela menor utilização de material necessário. Existe sempre, no caso dos quebramares destacados, um problema entre o rendimento transversal e em planta, já que os casos mais

eficazes na mitigação de galgamentos representam um acréscimo de erosão a sotamar da estrutura. As obras longitudinais aderentes não registam esse comportamento, mas devido a terem menos variantes, não é possível conjugar parâmetros e obter soluções que se adequam mais à zona de implementação, e nos quebramares destacados consegue-se baixar a cota de coroamento, o que resulta em menos material utilizado, e se reflete numa menor área de variação, sem alterar o comprimento da estrutura.

Assim entende-se que nos quebramares destacados submersos, para a solução ser equilibrada entre o comportamento transversal e em planta, deve assumir a profundidade de coroamento média de 3m, resultando numa estrutura com 4m de altura. Desta forma é possível reduzir o espraçamento entre os 17 e 25%, mitigar galgamentos até onda incidentes de 5m e, tendo uma extensão de 400m, esta solução assume 12 267m³ de volume, resultando num balanço entre áreas de erosão e acreção de 32 mil m² em erosão. Como uma das limitações do GENESIS é não permitir o *input* das inclinações das estruturas, as inclinações analisadas nas obras longitudinais aderentes não representam alterações no comportamento da linha de costa. Assim a análise a esta solução torna-se menos específica. Devido a esse facto, a solução mais rentável é com uma inclinação de 1/3 (V/H), que reduz o espraçamento em 41%, mitigando galgamento até uma altura de onda incidente de 9m e, para a extensão de 400m, apresenta um volume de 15 800 m³, o que se traduz numa erosão de 24 067 m².

Na comparação direta, a obra longitudinal aderente apresenta maior rendimento transversal, pouca influência na alteração da linha de costa, sobretudo a sotamar da estrutura, com um pequeno aumento no volume necessário. Em contrapartida, os quebramares destacados conseguem proteger uma maior zona costeira devido à formação do tómbolo, proporcionando zonas de acreção de areal que vai além da extensão da estrutura. O próprio tómbolo torna a solução mais eficaz na redução do espraçamento original, já que a zona de acreção representa uma maior distância percorrida pela onda em fase de espraçamento. A estrutura designada como preferível nos quebramares destacados submersos, com uma profundidade de coroamento de 3m, protege 1.6km de costa devido à zona em acreção, mas a sotamar da estrutura agrava-se o problema da erosão, registando mais 8 mil m² de erosão do que sem obra. A obra longitudinal aderente com o mesmo comprimento protege apenas

o decorrer da sua extensão, onde mantém a linha de costa 0.4 km, verificando a mesma área perdida que no cenário sem obra.

Num contexto geral, a melhor opção depende do tipo de ameaça mais relevante para a costa que se pretende defender. As obras longitudinais aderentes têm a valência de fixar a linha de costa ao longo da extensão de implementação. Tirando partido disso, são uma aconselhável solução em casos de permanente recuo da linha de costa e consequente avanço do mar sem prejudicar as zonas vizinhas com o agravamento da erosão. O quebramar destacado abrange uma maior zona de defesa, conseguindo colmatar a erosão até uma extensão de 4 vezes o comprimento da estrutura, passando o problema para sotamar. Útil em casos onde a zona que se pretende defender tem um valor muito superior das zonas vizinhas.

5.3 Desenvolvimentos Futuros

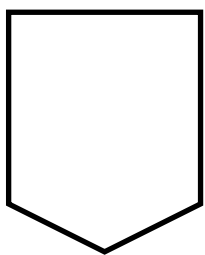
Entende que todas as conclusões que anteriormente se assumem são provenientes de resultados indicadores, fruto da sobreposição de diferentes análises de sensibilidade, onde devem ser alvo de análises específicas que comprovem a sua veracidade de forma clara.

Em futuras análises à temática visada, entendem-se algumas possíveis abordagens como caminhos a seguir. A nível transversal, perceber de que forma é importante o perfil de praia escolhido, se com a utilização de outro perfil existirá um impacto no rendimento das obras. Alterar a abordagem realizada em caso de aumento da cota de coroamento em estrutura existente, testando diferentes formas de aumento da cota de coroamento. Perceber se existe um perfil de aumento mais rentável, reduzindo mais os galgamentos e com menores quantidades de material necessário, transversalmente. Numa análise em planta, perceber o impacto da batimetria com zonas modeladas mais irregulares. Analisar diferentes climas de agitação na modelação elaborada em planta, onde se estudam as consequências da alteração da direção, período e altura de onda incidente, medido em áreas de erosão.

A nível estrutural, analisar combinações de estruturas de defesa costeira que permitam formar uma solução mais completa a tanto transversalmente como em planta, tirando partido das valências de umas estruturas para colmatarem as debilidades de outras que tenham um

papel mais preponderante. Na tentativa de resolver o problema associado à construção de quebramares destacados, uma próxima abordagem poderá passar pela avaliação dos custos associados à dragagem periódica do assoreamento, passando o material retirado para a zona em erosão, medida que embora resolva o problema da erosão provocada pela estrutura, poderá representar custos elevados. Testar outras localizações de implantação dos quebramares destacados, e perceber o impacto mediante diferentes afastamentos à linha de costa, alteração da batimetria e diferentes profundidades. Para além do posicionamento, os quebramares destacados também podem variar a direção do eixo da obra. Perceber qual o impacto com a colocação da estrutura direcionada perpendicularmente à direção da agitação incidente, onde se existem maiores zonas de acreção ou erosão.

Desenvolver o contexto econômico relacionado com a abordagem realizada, atribuindo valores de construção às áreas e volumes de material que se obteve em cada solução, já que o custo de construção por m^3 varia, podendo não justificar soluções mistas, por exemplo. Fazer uma qualificação prévia do território próximo da zona de intervenção, onde com a posterior análise em planta às zonas em erosão seja possível quantificar diferentes valores e impactos para as zonas em erosão e acreção.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahrens, J. (2001) - “Wave transmission over and through rubble-mound breakwaters”, Contract Report submitted to U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.

Burcharth, H., Hawkins, S., Zanuttigh, B., Lamberti, A. (2007) - “Environmental Design Guidelines for Low crested Coastal Structures, Londres, Elsevier.

Buccino, M., e M. Calabrese. 2007 - “Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters”, Journal Of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering (June): 213–225p.

Coelho, C. (2005) - “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 p.

Cornish, V. (1898) - “On sea beaches and sandbanks”, Geographical Journal, 11:528-559, 628-647. Citado em Woodroffe, C. (2002).

Cruz, T., Pereira, C., Coelho, C., Roebeling, P. (2015) - “Desempenho de obras longitudinais aderentes no concelho de Ovar”, VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Portugal.

d’Angremond, K., Van der Meer, J., Jong, R. (1996) - “Wave transmission at low crested structures”, ASCE, Proc. ICCE, Orlando, Florida, 3305-3318.

David, B. (2006) - “Shore Protection Projects:”, autor do capítulo V-3, Ph.D., Departamento de Engenharia Civil, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, 109 p.

Dean, R., Dalrymple, R. (2001) - “Coastal processes with Engineering Applications”, Cambridge University Press, United Kingdom, 464 p.

Debski, D., Loveless, J. (1997) - “Wave transmission and set-up at detached breakwaters”, capítulo “Effects of coastal structures”, “costal dynamics”, edited by Edward B. Thornton, pp 674 - 783.

Deltares (2016) - “Coastal protection and beach design”, obtido do instituto independente Deltares Netherland: www.deltares.nl, 29/11/2016.

Eurotop (2007) - “Wave overtopping of sea defences and related structures-assessment manual”; UK: Allsop N.; Pullen T.; Bruce T.; NL: van der Meer; DE: Schuttrumpf, H.; Kortenhaus A.

Freitas, J. (2010) – “O litoral português na época contemporânea: representações, praticas e consequências. Os casos de Espinho e do Algarve (c. 1851 a c. De 1990)”, tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Faculdade de letras, departamento de historia, 398 p.

Goda, Y., Takada, N., Monya, Y. (1967) - "Laboratory Investigation of Wave Transmission over Breakwaters", Report of the Port and Harbour Research Institute, No. 13, 38 p.

Gomes, R. (2004) - “Perfil praiar em equilíbrio da praia de Meaípe – Espírito Santo”, Universidade federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Brasil, 65p.

Hanson, H., Kraus, N. (1989) - “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change”; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p.

Huang, W., Chou, C., Yim, J. (2004) – “On Reflection and Diffraction due to a Detached Breakwater”, Ocean Engineering 32 1762–1779, Elsevier, 18 p.

Jefferys, H. (1944) - “Note on the offshore bar problem and reflection from a bar,” Wave Report 3, Ministry of Supply.

Lima, M. (2011) - “Programação de métodos de pré-dimensionamento de obras costeiras”, tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 124 p.

Lewis, W. (1931) - “The effect of wave incidence on the configuration of a shingle beach”. Geographical journal, 78:129-148. Citado em Woodroffe (2002).

Martins, A. (2012) - “Análise da rebentação de ondas com ensaios em laboratório”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 110 p.

Marinho, B. (2013) – “Procedimentos no estudo de obras de defesa costeira”, tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 134 p.

Morfett, A. (1998) - “Hydraulics in civil and environmental engineering”, third edition, E & FN spon, London, 529 p.

Narra, P., Coelho, C, Sancho, F. (2015) - “Evolução Temporal da Vulnerabilidade à Erosão Costeira no Distrito de Aveiro”, Processos Físicos e Evolução da Linha de Costa, VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Aveiro, Portugal.

Nunes, B. (2012) - “Comportamento de Quebramares Destacados no Litoral Noroeste Português”, tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 67 p.

Pedrosa, A. (2012) - “Risco de erosão no litoral Norte de Portugal: uma questão de ordenamento do território”, Fac. de Letras da Universidade do Porto, CEGOT, Portugal.

Pereira, G. (2008) – “Projeto de um Quebramar Destacado de Proteção para a Frente Marítima de Espinho”, Tese de Mestrado, Especialização em Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 222 p.

Rijn, L. (1998) - “Principles of coastal morphology”, chapter 4, “Sand coasts”, aqua publications, Amsterdam, the Netherlands, 538 p.

Rijn, L. (2013) - “Design of hard coastal structures against erosion”, obtido de: www.leovanrijn-sediment.com, última consulta a 19/11/2016.

Romão, S., Batista, P., Bernardes, C (2015) - “Balanço Sedimentar Costeiro no Troço Litoral entre a Barra e a Praia de Mira”, Processos Físicos e Evolução da Linha de Costa, VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Aveiro, Portugal.

Simões, S. (2013) - “Associação de Quebramares Submersos com Diferentes Configurações: Análises de Eficiência”, tese de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 70 p.

Silverter, R. (1974) - “Coastal engineering II, Sedimentation, estuaries, tides, effluents and modelling”, department of civil engineering, University of Western Australia, Nedlands, 311 p.

Sousa, N. (2011) - “Obras marítimas de acostagem: O caso de estudo do porto de abrigo da ilha do Porto Santo”, tese de mestrado, Universidade da Madeira, Funchal, 179p.

Taveira-Pinto, F. (2001) - “Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebramares submersos sob a ação da agitação marítima”, tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 300 p.

Teixeira, N. (2014) - “Estudo do limite de espraçamento das ondas”, tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 103 p.

Valente, F. (2015) - “Estudo do impacto da erosão costeira na frente marítima”, tese de mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 176p.

Van der Meer, J., Briganti, R., Zanuttigh, B., Wang, B. (2005) – “Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change”, Coastal engineering 52, Elsevier, 915–929p.

Van der Meer, J., Daemen, I. (1994) - “Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures”, Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering 1, 1 – 19.

Veloso-Gomes, F. (2010) - “Contributos para a revisão do plano de ordenamento da orla costeira na região centro”; Quintas Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Woodroffe, C. (2002) - “Coasts: form, process and evolution”, school of Geosciences, University of Wollongong, Cambridge University Press, Australia, 623 p.